

OBSERVATORIO DE MOVILIDAD VIAL

JOSE ALFREDO JARAMILLO VILLEGAS

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
MAESTRÍA EN INSTRUMENTACIÓN FÍSICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN SIRIUS
PEREIRA
2010**

OBSERVATORIO DE MOVILIDAD VIAL

JOSE ALFREDO JARAMILLO VILLEGAS

**Informe final de trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Magister en Instrumentación Física**

Director: MSc. WILLIAM ARDILA URENA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
MAESTRÍA EN INSTRUMENTACIÓN FÍSICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN SIRIUS
PEREIRA
2010**

CONTENIDO

	pág.
1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.1.1 Diagnostico o situación problema.	21
1.1.2 Formulación del problema	21
1.1.3 Trabajos previos	22
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo General	25
1.2.2 Objetivos Específicos	25
1.3 JUSTIFICACIÓN	25
2. MOVILIDAD VIAL	27
2.1 DEFINICIONES	27
2.1.1 Accesibilidad	27
2.1.2 Autoridad de Transporte Público (ATP)	27
2.1.3 Desplazamiento	28
2.1.4 Medio de transporte	28
2.1.5 Movilidad	28
2.1.6 Desarrollo sostenible	28
2.2 MOVILIDAD SOSTENIBLE	29

2.3	INICIATIVAS EN MOVILIDAD SOSTENIBLE	31
2.3.1	In Town Without My Car! – Unión Europea	31
2.3.2	European Mobility Week – Unión Europea	32
2.3.3	Iniciativa CIVITAS – Unión Europea	33
2.3.4	POLIS, Ciudades y Regiones por un Mejor Transporte – Unión Europea	34
2.3.5	El Centro para Transporte Sostenible - Canadá	36
2.3.6	EMBARQ – A nivel Mundial	37
2.3.7	Otros Proyectos e Iniciativas	38
2.4	OBSERVATORIO DE MOVILIDAD VIAL	41
2.4.1	Objetivos	41
2.4.2	Modelar el Tráfico	41
2.4.3	Simulación	41
2.4.4	Seguimiento y Evaluación de Políticas.	42
2.4.5	Sistema de Semaforización	42
2.4.6	Análisis Comparativo (Benchmarking).	42
2.4.7	Identificación de buenas prácticas.	42
2.4.8	Fortalecimiento de la participación.	43
2.4.9	Soporte a la toma de decisiones.	43
2.5	ESTADO DEL ARTE	44
2.5.1	Barómetro EMTA	44
2.5.2	Observatorio de Movilidad Metropolitana - España	45

2.5.3 OMV - Caso Bogotá (Colombia)	47
2.6 OMV – CASO PEREIRA	49
2.6.1 Introducción	49
2.6.2 Características Principales	50
2.6.3 Esquema General	50
3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES DE TRÁFICO	55
3.1 INTRODUCCIÓN A LA VISIÓN POR COMPUTADOR	55
3.2 HISTORIA	56
3.3 SISTEMAS DE VISIÓN POR COMPUTADOR	57
3.3.1 Percepción y Adquisición	58
3.3.2 Pre-Procesado:	61
3.3.3 Extracción de características:	62
3.3.4 Segmentación	63
3.3.5 Procesamiento de alto nivel	63
3.4 CONCEPTOS Y OPERACIONES	63
3.4.1 Matrices	64
3.4.2 Operaciones con Matrices	64
3.4.3 Espacio de Colores	68
3.4.4 Procesamiento digital de Imágenes	69
3.4.5 Operaciones morfológicas	73
3.4.6 Regiones de interés	75

3.4.7 Transformación de una imagen	76
3.4.8 Segmentación de la imagen	78
3.5 ESTADO DEL ARTE	82
3.5.1 Organizaciones	82
3.5.2 Empresas	83
3.5.3 Academia	84
3.6 OPENCV	86
3.6.1 ¿Qué es OpenCV?	86
3.6.2 ¿Por qué OpenCV?	87
3.6.3 Historia	88
3.6.4 Usando OpenCV	89
3.7 HARDWARE	93
3.7.1 Sistema de procesamiento	93
3.7.2 Cámara de video	95
3.8 IMPLEMENTACIÓN	101
3.8.1 Descripción general	102
3.8.2 Adquisición de video	104
3.8.3 Región de interés ROI	104
3.8.4 Escala de grises	106
3.8.5 Diferenciación de <i>frame</i>	106
3.8.6 Estimación de <i>background</i> – Algoritmo Media Segmentada	108

3.8.7 Umbral (<i>Threshold</i>)	114
3.8.8 Mix	115
3.8.9 Operaciones morfológicas	117
3.8.10 Contornos	118
3.8.11 Registro de contornos	119
3.8.12 Aforo de vehículos	122
3.8.13 Estimación de velocidad	122
3.9 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	124
3.9.1 Adquisición	124
3.9.2 Ejecución	126
3.9.3 Rendimiento	127
3.9.4 Aforo	132
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	139

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Cronología Visión por Computador	57
Tabla 2. Criterios de selección herramienta de procesamiento de imágenes	87
Tabla 3. Ponderación de criterios	87
Tabla 4. Estructuras de OpenCV	90
Tabla 5. Plataforma de implementación	93
Tabla 6. Hardware y software	94
Tabla 7. Características del video adquirido	124
Tabla 8. Videos adquiridos para procesar	125
Tabla 9. Desempeño de videos	127
Tabla 10. Desempeño en <i>fps</i> de los videos adquiridos	128
Tabla 11. Aforo manual	134
Tabla 12. Aforo automático versus manual	135

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ciudades integrantes en 2009 EMTA	24
Figura 2. Conciliar movilidad urbana y clima	29
Figura 3. Logo <i>In town without my car</i>	31
Figura 4. <i>European Mobility Week 2009</i>	32
Figura 5. La nueva evolución	33
Figura 6. Logo CIVITAS 2009	34
Figura 7. Logo POLIS	35
Figura 8. Logo CST	36
Figura 9. Logo EMBARQ	38
Figura 10. European Metropolitan Transport Authorities	45
Figura 11. Observatorio Movilidad Metropolitana - España	46
Figura 12. Centro de Investigación del Transporte TRANSyT	47
Figura 13. Observatorio de Movilidad Urbana Bogotá	48
Figura 14. Grupo de Investigación Sirius	50
Figura 15. Esquema General OMV Pereira	53
Figura 16. Relaciones entre visión por computador y otras áreas afines	56
Figura 17. Recepción de luz por el ojo humano	58
Figura 18. Filtro de Bayer (izquierda). Descomposición R, G, B, mediante prismas (Derecha).	59

Figura 19. Percepción humana versus percepción maquina	60
Figura 20. Captura con alta exposición (izquierda) versus captura con baja exposición (derecha).	61
Figura 21. Imagen sin ruido (izquierda) versus imagen con ruido (derecha)	62
Figura 22. Características de la imagen encerradas en un círculo rojo	63
Figura 23. Kernel de Sobel de 3x3, Punto de anclaje en (2,2)	66
Figura 24. Desplazamiento de la ventana móvil (Kernel) sobre la imagen a procesar	67
Figura 25. Convolución 2D	68
Figura 26. Espacio de colores: (a) Escala de Grises (b) RGB (c) CMYK (d) HSV	69
Figura 27. Imagen Original (izquierda) versus imagen suavizada usando media gaussiana de 11x11 (derecha)	70
Figura 28. Imagen original (izquierda) versus imagen escalada a la mitad (derecha)	71
Figura 29. Tipos de Umbral	72
Figura 30. Imagen tratada con un umbral mínimo de 85	73
Figura 31. Operaciones Morfológicas	75
Figura 32. Región de Interés (ROI)	75
Figura 33. Umbral de histéresis	76
Figura 34. 34 Demostración del algoritmo de Canny con umbrales bajos (Canny 1) y altos (Canny 2)	77
Figura 35. Transformación proyectiva (Rectángulo – Cuadrilátero)	77
Figura 36. Punto de Fuga e imagen perspectiva	78

Figura 37. Elementos superficiales al fondo (Color Rojo), Vía perteneciente al fondo (Color Cian)	79
Figura 38. Diferencia de frames y umbralizado	80
Figura 39. Media móvil	81
Figura 40. Mezcla Gaussiana	81
Figura 41. Logo UKIVA	82
Figura 42. Logo <i>CVonline</i>	83
Figura 43. Logo ISS	84
Figura 44. Cámara TrafiCam Semáforo carrera 6 calle 19 – Pereira	85
Figura 45. Conteo automático de vehículos	85
Figura 46. Logo OpenCV	86
Figura 47. Cronología OpenCV	89
Figura 48. Componentes de OpenCV	90
Figura 49. (a) Placa Base (b) CPU y Disipador (c) Memorias RAM (d) Disco Duro	95
Figura 50. Cámara Elphel 353	96
Figura 51. Hardware de camara Elphel	97
Figura 52. Esquema de la placa base 10353 usada por la cámara de pruebas	98
Figura 53. Interfaces de la cámara Elphel	100
Figura 54. “Mano con Globo Reflectante” M.C. Escher. La dificultad de interpretación en visión por computador	101
Figura 55. Diagrama de bloques del algoritmo	103

Figura 56. Adquisición de la imagen	104
Figura 57. Región de interés (ROI)	105
Figura 58. Escala de grises	106
Figura 59. <i>Frames</i> para diferenciación	107
Figura 60. Resultado de la diferenciación entre <i>frames</i>	108
Figura 61. Análisis de color	109
Figura 62. Segmentación del escenario	110
Figura 63. Análisis de color en una región en el caso Invico	110
Figura 64. Mascara para actualización de <i>background</i>	112
Figura 65. <i>Background</i>	112
Figura 66. Comparación entre el <i>frame</i> actual y el <i>background</i>	113
Figura 67. Diferencia de <i>background</i>	113
Figura 68. Umbral sobre diferenciación de <i>frame</i>	114
Figura 69. Umbral diferenciación de <i>background</i>	115
Figura 70. Comparación entre diferenciación y <i>background</i>	116
Figura 71. Resultado de operación Mix	117
Figura 72. Operaciones morfológicas	118
Figura 73. Contornos	119
Figura 74. Correspondencia de contornos	120
Figura 75. Seguimiento del algoritmo	121
Figura 76. Estimación de velocidad	123

Figura 77. Banco de pruebas	126
Figura 78. Tiempos de procesamiento de la aplicación en los distintos escenarios de ejecución	129
Figura 79. Cantidad de <i>frames</i> por segundo en cada escenario de ejecución	130
Figura 80. Tiempo de procesamiento para cada <i>frame</i> en el video “invico_2.avi”	131
Figura 81. <i>Frames</i> por segundo procesados video “invico_2.avi”	131
Figura 82. El caso Invico	133
Figura 83. Aforo automático	134
Figura 84. Aforo automático versus manual	135
Figura 85. Error porcentual del algoritmo de aforo automático	136
Figura 86. Sentido vial	137

RESUMEN

El Grupo de Investigación Sirius de la Universidad Tecnológica de Pereira, con el apoyo de Colciencias, tiene a cargo el diseño de un prototipo de Observatorio de Movilidad Vial (OMV) en la ciudad de Pereira. El OMV busca medir las variables más relevantes del tráfico, de manera tal que pueda modelarlas tanto espacial como temporalmente, para luego, basados en los datos obtenidos, simular múltiples escenarios, idear nuevas estrategias que permitan un continuo mejoramiento de la movilidad en la ciudad, evaluar el impacto real de dichas estrategias y, por último, tener un sistema de semaforización dinámico, capaz de adaptarse en tiempo real a los cambios de demanda.

Este trabajo se divide en cuatro partes fundamentales, primero, un sistema de medición de variables de tráfico basado en estrategias de visión por computador aplicadas al video adquirido en tiempo real por cámaras IP ubicadas en las intersecciones a evaluar, segundo, un sistema de comunicación que permita transferir tanto los datos adquiridos por el sistema de medición como el mismo video en tiempo real, tercero, un Sistema de Información Geográfica SIG capaz de recibir los datos de las diferentes intersecciones implementadas, y finalmente, un sistema de visualización en el cual se pueda identificar el estado del tráfico en tiempo real, los históricos de las variables medidas y el video de las intersecciones.

INTRODUCCIÓN

Las zonas urbanas constituyen hoy el entorno vital de la inmensa mayoría de la población. Es indispensable que la calidad de vida en ellas sea lo más alta posible. Esta es la razón de que tengamos que reflexionar en común y estudiar el tema de la movilidad urbana.

El tema crucial de la movilidad urbana debe abordarse de forma colectiva en todas las instancias, locales, regionales y nacionales. El aumento del tráfico en los centros de las ciudades provoca una congestión crónica, con numerosas consecuencias negativas por la pérdida de tiempo y los daños al medio ambiente.

El reto supuesto por el desarrollo sostenible en las zonas urbanas es inmenso: reconciliar el desarrollo económico de las ciudades y su accesibilidad, por una parte, con la mejora de la calidad de vida y la protección del medio ambiente, por otra. Ante estas cuestiones con repercusiones numerosas y variadas, un esfuerzo común permitirá fomentar la búsqueda de soluciones innovadoras y ambiciosas en materia de transporte urbano con vistas a unas ciudades menos contaminantes y más accesibles y en las que la circulación sea más fluida.

Las experiencias de los interesados revelan que no existen soluciones únicas para reducir la congestión. No obstante, deben hacerse atractivas y seguras alternativas al automóvil privado como, por ejemplo, la marcha a pie, la bicicleta, el transporte colectivo o el uso de ciclomotores. Los ciudadanos deberían ser capaces de sacar el máximo partido a sus recorridos gracias a un enlace eficaz entre los diversos modos de transporte. Las autoridades deberían promover la comodidad y reasignar el espacio liberado tras las medidas de la mitigación de congestión. Unos sistemas de gestión del tráfico inteligentes y capaces de adaptarse, en su sentido más amplio, aplicados a la gestión, también han demostrado su eficacia a la hora de reducir la congestión.

Libro Verde UE - Hacia una Nueva Cultura de la Movilidad Urbana

1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Diagnostico o situación problema.

La movilidad es uno de los principales problemas que hay que resolver en los centros urbanísticos. A nivel mundial, se han creado un sin número de instituciones que intentan descubrir maneras eficientes de interrelacionar la estructura de la malla vial con los vehículos e individuos que transitan a través de ella. Muchas de estas instituciones son, en primera instancia, observatorios que permiten establecer una ventana a través de la cual se puede analizar ampliamente el panorama de movilidad en una ciudad u otra.

Con el constante crecimiento de las ciudades medias (específicamente la ciudad de Pereira), uno de los nuevos desafíos que deben enfrentar estas urbes, es el de la movilidad de sus habitantes en los distintos modos de transporte con los cuales el municipio dispone, ya sea de carácter público (buses y el Sistema de Transporte Masivo MEGABUS) o de carácter privado (particulares, motos, taxis, etc.). Por esta razón, la movilidad se ha convertido en el eje fundamental de planeación para las metrópolis de hoy y del mañana, asumiendo un rol protagónico en cada administración de las distintas ciudades.

Todo este revuelo levantado por un factor de interés general para la sociedad, ha captado la atención del Laboratorio Sirius HPC que, con ayuda de la Universidad Tecnológica de Pereira y el apoyo de Colciencias, se ha puesto en la tarea de buscar estrategias para mejorar en la medida de lo posible la movilidad de los pereiranos.

Fruto de esta preocupación, nace la idea de crear el primer observatorio de movilidad vial para la ciudad Pereira. Con el cual se busca cuantificar indicadores precisos que permitan conocer el estado real de la movilidad en el municipio, esto, con el fin de poder hacer un correcto seguimiento y evaluación de las distintas estrategias tomadas por las autoridades locales en materia vial.

1.1.2 Formulación del problema

Uno de los principales objetivos de un observatorio es la medición de variables para identificar comportamientos y caracterizar el objeto estudiado. En consecuencia, un buen sistema de medición permitirá realizar una mejor caracterización del objeto.

Sin embargo, cuando se considera el tráfico vehicular de una ciudad este proceso se dificulta considerablemente. Este es un fenómeno que, por su estructura y complejidad,

requiere el diseño de un sistema que permita realizar una precisa medición y monitoreo de los elementos relevantes que inciden en su comportamiento. Es necesario además, que dichas mediciones se tomen en tiempo real y que se adapten a la dinámica inherente en el tráfico.

Este proceso de medición adquiere gran importancia para el éxito del Observatorio de Movilidad Vial en cuanto se constituye como la principal fuente de datos. Se desea responder entonces:

- ¿Es posible generar un sistema de medición automática de variables de tráfico para el Observatorio de Movilidad Vial de Pereira?
- ¿Se puede adaptar dicho sistema a diferentes escenarios en la ciudad?
- ¿El sistema presenta niveles de error por debajo de los sistemas de medición existentes en la ciudad?

1.1.3 Trabajos previos

El impacto del problema de movilidad ha afectado a todas las ciudades en desarrollo del mundo. El desarrollo trae consigo la reducción de espacio para los automóviles, las personas y la malla vial misma. Por esta razón, en algún momento cada ciudad en progreso enfrenta su propio problema de movilidad, y es precisamente esa diversidad de ciudades, entornos, cultura y demás, lo que ha generado una diversidad de estrategias.

Dichas estrategias incluyen cobro por circular en ciertas zonas urbanas (Londres), prioridad asignada a movilidad colectiva y sistemas de transporte no motorizados (Seúl, Bogotá, Pereira), restricción de vehículos (*pico y placa* en Bogotá, *In town without my car!* en toda Europa), relocalización de personal a sitios cercanos al trabajo (Alemania), entre muchas otras.

Sin embargo, uno de los mayores retos es disponer de información suficiente para generar nuevas iniciativas y mejorar así el sistema de transporte urbano. Todo esto ha llevado a la creación de observatorios de movilidad vial que permiten, entre otras cosas, tener un conocimiento sustentado en cifras sobre los cambios generados por la dinámica misma de la ciudad y de cómo las estrategias adoptadas han afectado de una u otra manera la movilidad en cada caso. En el capítulo 2, referente a movilidad vial, se estudiará con mayor detalle el caso del Barómetro EMTA, el cual constituye la principal red de observatorios de movilidad en el mundo. También se verán los casos Madrid (España) y Bogotá (Colombia). Además, se presentarán algunos casos especiales de algunas otras estrategias que se han adoptado en pro de una movilidad sostenible.

Ahora bien, a nivel mundial se han creado organizaciones que interconectan observatorios en diferentes ciudades para el intercambio de información y *mejores prácticas*. Algunas

organizaciones, como EMTA (European Metropolitan Transport Authorities) y UITP (Unión Internacional de Transporte Público), realizan seguimientos periódicos de la movilidad y el transporte público en ciudades europeas y del mundo, respectivamente.

1.1.3.1 European Metropolitan Transport Authorities (EMTA)

La asociación EMTA fue creada en 1998 como un espacio para el intercambio de información y mejores prácticas entre las autoridades públicas responsables de planificar, integrar y financiar los servicios de transporte público en las grandes ciudades europeas [1].

EMTA congrega a 33 autoridades responsables del transporte público de las principales áreas metropolitanas europeas, en las que 85 millones de personas viven, trabajan y disfrutan de su tiempo libre.

Su intención es mejorar la gestión de la movilidad y la calidad de los servicios de transporte público en el entorno urbano de las ciudades europeas asociadas. Entre sus objetivos específicos se encuentran:

- Desempeñar un papel clave en el desarrollo sostenible de las redes de servicios de transporte público en las ciudades y áreas urbanas asociadas.
- Constituir un lugar para el intercambio de información, experiencias y conocimiento entre las autoridades del transporte público (tanto internamente como con aquellos que han puesto en ello su interés).
- Anticiparse a tendencias futuras y plantear cuestiones nuevas que puedan afectar al modo en el que las autoridades del transporte público desempeñan su papel en la planificación y coordinación de las redes de transporte.
- Participar en debates para la definición e implantación de la Política de la Unión Europea en lo relativo a movilidad urbana.

EMTA celebra una reunión general dos veces al año, en la que:

- La ciudad o área metropolitana anfitriona presenta en detalle su organización y sus principales intereses.
- Los miembros pueden informar libremente a otros miembros de asuntos recurrentes, experiencias innovadoras, así como ponerlos al día con datos de proyectos ya implantados o en ejecución.
- Tienen lugar debates informales e intercambios que forman vínculos y fortalecen la red.

EMTA establece grupos de trabajo que se centran en inquietudes comunes y:

- Definen los asuntos que deben tratarse.
- Realizan encuestas, recopilan datos concretos y estadísticas y llevan a cabo estudios en profundidad, posiblemente en colaboración con otras organizaciones.
- Divulgan las conclusiones de dichos estudios mediante publicaciones o seminarios.

Figura 1. Ciudades integrantes en 2009 EMTA



Fuente: EMTA

1.1.3.2 Unión Internacional de Transporte Público (UITP)

La UITP, fundada en 1885, es una asociación mundial de operadores de transporte de peatones urbano y regional, sus autoridades y proveedores. Con sede en Bruselas actualmente cuenta con 2000 miembros en más de 80 países.

La UITP proporciona información, investigación y análisis sobre todos los aspectos del transporte público incluyendo la infraestructura, material rodante, la organización y gestión.

En 2003 se fundó la división de la UITP en Latinoamérica como respuesta a los crecientes problemas que hicieron de la movilidad un tema bastante importante en esta parte del continente [2]. Según Hans Rat, Secretario General de la UITP, durante el lanzamiento de

la nueva División «El acceso a un transporte eficaz y asequible es un elemento vital para mejorar el bienestar económico en Latinoamérica».

De esta manera se evidencia todo el trabajo que en torno a la movilidad vial se ha generado a nivel mundial y se muestra como las ciudades latinoamericanas no pueden ser indiferentes a un asunto de tan alta importancia, sino que deben unirse a este tipo de organizaciones que intentan encontrar un balance económico, social y ambiental para la movilidad vial.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

El observatorio de movilidad vial tiene como objetivo principal brindarle a las ciudades, y en particular a sus secretarías de tránsito y de planeación, un sistema que permita medir, procesar y almacenar las principales variables del tráfico de la malla vial, tal que a partir de información continua, se pueda modelar tanto espacial como temporalmente el sistema de tráfico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un prototipo de sistema de medición de variables de tráfico en tiempo real usando técnicas de visión por computador.
- Determinar el medio de comunicación necesario para cumplir los requerimientos de estabilidad, disponibilidad y capacidad de transmisión de datos.
- Implementar un Sistema de Información Geográfica que permita almacenar las variables de tráfico medidas en tiempo real.
- Desarrollar las interfaces gráficas y los métodos de visualización de la información obtenida, tal que permita analizar los comportamientos del tráfico en tiempo real.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Entre los pasos necesarios que conforman el método científico se encuentra la observación, este paso consiste en aplicar los sentidos a un objeto o a un fenómeno para estudiarlo tal como se presenta en realidad. Así pues, que al hacer investigación sobre el tráfico en la ciudad de Pereira se requiere un sistema capaz de medir variables viales y mantener datos históricos de las mismas.

Este proceso permitirá identificar las variables más relevantes en la movilidad de Pereira y, a partir de ellas, modelar tanto espacial como temporalmente el tráfico. Se podrán hacer entonces simulaciones de diferentes escenarios, aplicar diversas estrategias y políticas a esos escenarios y evaluar las estrategias adoptadas en un ambiente controlado. Luego, una vez implementada una u otra estrategia, es posible tener una retroalimentación del impacto real que esta tiene sobre el tráfico.

De esta manera se puede simular y evaluar cómo influyen las medidas del departamento de tránsito, como responde el tráfico ante un accidente en las vías o ante un cambio en la malla vial, y un sin número de cuestiones acerca de la movilidad vial. Todo esto ha motivado la creación del observatorio de movilidad vial y bajo este marco, como primera medida, es necesario un sistema que permita la medición de dichas variables viales.

Además, la medición de los elementos relevantes que influyen en el comportamiento del tránsito vehicular permite identificar nuevas posibles causas de la problemática de movilidad en Pereira. Los datos obtenidos por el sistema de medición, ayudarán a analizar y diseñar nuevas políticas y actuaciones que tiendan a una gestión sostenible de la movilidad y, como se dijo antes, evaluar la eficiencia de las estrategias adoptadas por las autoridades de control vehicular de Pereira.

Por otra parte, los estudios realizados y el conocimiento adquirido en el campo de la visión por computador y el procesamiento digital de imágenes, sirve de base para futuros proyectos de investigación en la región, abriendo así muchas otras oportunidades en diferentes campos.

El proyecto contribuye en la mejora del sistema de movilidad, que busca interrelacionar de manera integral la infraestructura urbana y los que circulan a través de ella. El manejo adecuado de esta interrelación promoverá la movilidad sostenible, que se reflejará en mejores condiciones de calidad de vida para los ciudadanos que habitan el municipio.

2. MOVILIDAD VIAL

2.1 DEFINICIONES

Hablar de movilidad vial y movilidad sostenible requiere algunos conceptos que permitan hacer una mejor apropiación de los temas tratados en todo este campo. Se trata pues de dar una definición compacta y clara de los siguientes términos, tomando como referencia la Proposición de Ley de Movilidad Sostenible de GreenPeace España [3]:

2.1.1 Accesibilidad

Capacidad de llegar en condiciones adecuadas a los lugares de residencia, trabajo, formación, asistencia sanitaria, interés social, prestación de servicios u ocio, desde el punto de vista de la calidad y disponibilidad de las infraestructuras, redes de movilidad y servicios de transporte.

El concepto se amplía cuando se estratifica la comunidad y se analiza la accesibilidad desde diferentes perspectivas. Entonces aparece la accesibilidad para niños, para ancianos, para gente de escasos recursos, discapacitados, entre otros.

2.1.2 Autoridad de Transporte Público (ATP)

Organismo de carácter público responsable de la planificación y gestión del sistema de transporte público en un área metropolitana.

El transporte público y su uso son de vital importancia para la movilidad de las ciudades en la actualidad. Como se verá más adelante, es tal vez el único medio de transporte motorizado considerado dentro de los actuales planes de movilidad sostenible. Por tanto, una entidad encargada de regular las tarifas, la oferta y en general toda la estructura del mismo es sumamente importante. Se pueden definir los siguientes objetivos para una ATP:

- Planificación de la infraestructura de transporte público de viajeros.
- Coordinación de los servicios ofrecidos por los operadores.
- Financiación del sistema mediante acuerdo entre las Administraciones competentes.
- Contratos con los operadores.
- Política tarifaria.
- Definición y promoción de la imagen corporativa del sistema.
- Información integrada a los usuarios.

2.1.3 Desplazamiento

Itinerario, con origen y destino definidos, en el que se utilizan uno o varios medios de transporte y que se puede dividir en una o varias etapas. La reducción de desplazamientos tiene una gran influencia en la actual planificación urbana de las ciudades.

2.1.4 Medio de transporte

Conjunto de técnicas, instrumentos y dispositivos de características homogéneas en cuanto a la tecnología que se utilizan para el transporte de personas o mercancías, incluida la marcha a pie.

2.1.5 Movilidad

La movilidad es simplemente un medio para permitir a los ciudadanos, colectivos y empresas acceder a la multiplicidad de servicios, equipamientos y oportunidades que ofrece la ciudad. Específicamente se puede definir también como el conjunto de desplazamientos que las personas y los bienes deben hacer por motivo laboral, formativo, sanitario, social, cultural o de ocio, o por cualquier otro.

Sin embargo, ahora no se puede pensar solamente en como las personas se desplazan, sino como ese desplazamiento se puede hacer de manera más eficiente, con la menor cantidad de viajes posibles y en medios de transporte limpios. Este se constituye en uno de los principios de la movilidad sostenible.

2.1.6 Desarrollo sostenible

En 1987, en el Brundtland Report [4] se definió desarrollo sostenible como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

Al principio se le consideró una definición vaga y un poco ambigua, sin embargo, posteriores intentos llevaron a definiciones aun más ambiguas [5] [6]. Por tal motivo, hoy en día es la definición con mayor reconocimiento a nivel mundial y marca, para la movilidad, las tres dimensiones que tiene el desarrollo sostenible: La económica, la social y la ambiental.

2.2 MOVILIDAD SOSTENIBLE

La movilidad o transporte sostenible es un fenómeno subyacente al ya ampliamente conocido desarrollo sostenible. Hablar del tema, no simplemente hace referencia al hecho de los desplazamientos de personas dentro de una estructura urbana. Movilidad sostenible es un concepto interdisciplinario que abarca desde políticas de transporte seguro, reducción de viajes necesarios en los centros urbanos, planificación estructural de las ciudades, planeación de tarifas en transporte público y muchas otras cuestiones ambientales, sociales y políticas. Conciliar Movilidad Urbana y Clima

Según Greenpeace España [3], la movilidad es realmente sostenible si *“se satisface en un tiempo y con un coste razonables y minimiza los efectos negativos sobre el entorno y la calidad de vida de las personas”*.

Figura 2. Conciliar movilidad urbana y clima



Fuente: Greenpeace España

Por otra parte, la definición de la Unión Europea (EU), que está basada en la definición del CST (Centro para Transporte Sostenible) de Canadá es la más utilizada a nivel mundial [5] [6]. Aunque se han presentado largas discusiones sobre el tema, después de algunas modificaciones y adaptaciones se estableció de la siguiente manera:

Un Sistema de Transporte Sostenible es uno que:

- Permite que las necesidades de acceso básicas de los individuos y las sociedades se satisfagan con seguridad y de manera compatible con el bienestar humano y de los ecosistemas, y con equidad dentro y entre las generaciones.

- Resulta asequible, opera de manera eficiente, ofrece diferentes modos de transporte y apoya una economía cambiante.
- Limita las emisiones y residuos dentro de la capacidad del planeta para absorberlos, minimiza el consumo de recursos no renovables, limita el consumo de recursos renovables a un nivel sostenible, reutiliza y recicla sus componentes, reduce al mínimo el uso de la tierra y la producción de ruido.

Por tanto, las políticas de movilidad sostenible han de ser una amplia consolidación de estrategias, ideas, planes y prácticas que incorporen un modelo de ciudad más compacto. Dichas estrategias no pueden ignorar la importancia del automóvil, pero deben limitar su expansión y regular su uso, ofreciendo y promocionando alternativas viables basadas en otros tipos de movilidad no motorizadas. Todo esto, para constituir una red de transporte público que permita el acceso global a bienes, servicios y oportunidades de forma oportuna y equitativa.

En particular, el objetivo común del desarrollo sostenible encuentra en el transporte urbano uno de sus elementos esenciales. Las vertientes social y económica de la movilidad sostenible deben hacerse compatibles con el respeto del medio ambiente urbano. La mejora de las infraestructuras, el consumo de carburantes, los accidentes de tráfico, la accesibilidad de las ciudades, pero también la calidad del aire son aspectos esenciales contenidos en la sostenibilidad del transporte e ineludibles para alcanzar el desarrollo sostenible.

Albert Camus¹ nos recordó que "la mejor manera de ser generoso con el futuro, es darlo todo en el presente". Se evidencia entonces la necesidad de cambiar la idea que las personas tienen sobre los medios de transporte, la malla vial y su papel dentro de esta. Su comportamiento, los medios de transporte que usan para sus desplazamientos, su idea sobre el automóvil, su preocupación por el ambiente y muchos otros factores son cruciales para la movilidad sostenible.

En las secciones siguientes, se dan descripciones generales de algunas organizaciones, proyectos e iniciativas que trabajan en busca de mejorar la movilidad de las grandes metrópolis a nivel mundial.

¹ **Albert Camus** (1913 — 1960). Novelista, ensayista, dramaturgo y filósofo francés. Premio Nobel de Literatura por 1957.

2.3 INICIATIVAS EN MOVILIDAD SOSTENIBLE

2.3.1 In Town Without My Car! – Unión Europea

El principal objetivo de esta iniciativa es motivar a las ciudades para que durante este día cierren las calles en ciertas aéreas para los medios de transporte motorizados privados. De esta manera, las autoridades locales pueden mostrar un panorama diferente a los ciudadanos, motivándolos a usar medios de transporte alternos no contaminantes y sostenibles.

Figura 3. Logo *In town without my car*



Fuente: *European Mobility Week*

La idea de Eric Britton se había implementado en Reykjavík (Islandia), Bath (Gran Bretaña) y La Rochelle (Francia). Luego, en 1997 la ETA (Environmental Transport Association) organizó la primera campaña nacional en Gran Bretaña conocida como “Car Free Day” [7].

Después de esto, en 1998 la Comisión Europea promovió “In Town Without My Car!” y desde entonces es organizada anualmente el 22 de septiembre.

El éxito de la campaña se extendió por toda la Unión Europea y más tarde en todo el mundo. En 2008 “In Town Without My Car!” involucró casi 2000 ciudades en 38 países alrededor del mundo.

Gracias al éxito que tuvo “In Town Without My Car!” y la popularidad que se ganó entre los europeos y en general, en la comunidad mundial, la Comisión Europea decidió dar soporte a una iniciativa aun más ambiciosa: “European Mobility Week”.

2.3.2 European Mobility Week – Unión Europea

La Semana de Movilidad Europea (*European Mobility Week*) [8] es una iniciativa coordinada por tres redes de ciudades europeas (EUROCITIES, CLIMATE ALLIANCE y ENERGIE-CITÉS) con el soporte de la Comisión Europea. El objetivo es informar, concientizar y dar participación a la ciudadanía para promover la movilidad sostenible.

Figura 4. *European Mobility Week 2009*



Fuente: *European Mobility Week*

Cada año, desde 2002, importantes ciudades europeas se unen en una intensa campaña de educación sobre la importancia del uso del transporte público y sistemas de transporte no motorizado. Además, son tratados temas como la polución, el ruido, cambio climático, seguridad en las vías, eficiencia de energía y calidad de vida.

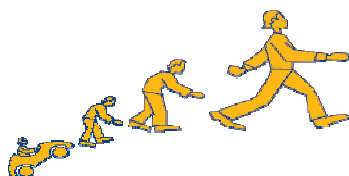
Esta campaña se realiza del 16 al 22 de septiembre. El final de esta semana de actividades coincide con “In Town Without My Car!” ya que fue pensada dentro del mismo contexto. Su éxito se ve reflejado en el aumento paulatino de ciudades participantes cada año.

Además, las ciudades participan en un concurso que busca y premia la ciudad con mayor compromiso en movilidad sostenible. De esta manera, se ha logrado que para la campaña de 2009 se registraran más de 2102 ciudades europeas.

Por ejemplo, en España, según el informe presentado sobre la Semana Europea de la Movilidad, *el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, en su tarea de*

coordinación nacional de estas iniciativas, trata de alentar la participación de los municipios y entidades españolas en estos eventos, contribuyendo así, a la creación de ciudades más saludables y sostenibles. Los participantes, mediante la realización de múltiples actividades durante la Semana Europea de la Movilidad, la implementación de medidas permanentes y la ejecución de buenas prácticas, colaboran en la tarea de mejorar la calidad del aire de sus ciudades, crear calles más seguras y accesibles para todos los ciudadanos y apoyar, de esta manera, los mecanismos de lucha contra el cambio climático que se están poniendo en marcha.

Figura 5. La nueva evolución



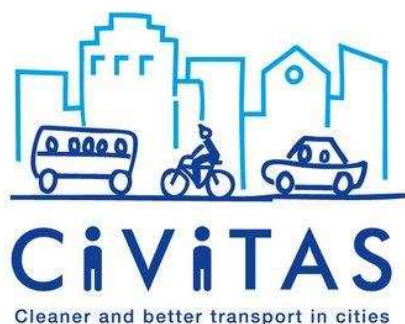
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente España

2.3.3 Iniciativa CIVITAS – Unión Europea

City-VITALity-Sustainability (Ciudad-Vitalidad-Sostenibilidad). Con la Iniciativa CIVITAS, la Comisión Europea [9] se dirige a generar un logro decisivo apoyando y evaluando la implementación de ambiciosas estrategias de transporte urbano sostenible integradas que deberían contribuir a mejorar considerablemente el bienestar de los ciudadanos europeos.

Dentro de CIVITAS I (2002-2006) existían 19 ciudades agrupadas en 4 proyectos de demostración, mientras que en CIVITAS II (2005-2009) forman parte 17 ciudades distribuidas en 4 proyectos demostrativos. La Unión Europea (UE) financia estas 36 ciudades en toda Europa.

Figura 6. Logo CIVITAS 2009



Fuente: CIVITAS

Objetivos:

- Promover e implementar medidas de transporte urbano sostenible, limpio y económico.
- Implementar paquetes integrados de tecnología y medidas políticas en el campo de la energía y de los transportes, repartidos en 8 categorías de medidas.
- Crear una crítica pública y los marcos innovadores.

Esta iniciativa ha formado varios grupos de trabajo entre diferentes ciudades que tratan diversos temas dentro del marco de la movilidad sostenible. *CIVITAS SUCCESS* (Preston, La Rochelle, Ploiesti), *CIVITAS SMILE* (Norwich, Suceava, Potenza, Malmö, Tallinn), *CIVITAS MOBILIS* (Toulouse, Debrecen, Venezia, Odense, Ljubljana), entre otros. *CIVITAS* ayuda a las ciudades a probar y demostrar paquetes integrados de medidas políticas y tecnológicas dirigidas a conseguir un sistema de transporte urbano más sostenible, limpio y eficiente.

A su vez, *CIVITAS* realiza un foro anual donde participantes de todo el mundo se reúnen a intercambiar ideas e información sobre movilidad sostenible, el único requisito para que una ciudad participe es que esté dispuesta a implementar estrategias innovadoras en transporte público y movilidad sostenible en general.

2.3.4 POLIS, Ciudades y Regiones por un Mejor Transporte – Unión Europea

Polis es una red de ciudades y regiones pioneras que cooperan para desarrollar tecnologías y políticas innovadoras para el transporte local en Europa [10]. Desde 1989

diversas autoridades locales y regionales europeas cooperan a través de Polis para implementar políticas de movilidad sostenible con el desarrollo de soluciones innovadoras para el transporte.

Figura 7. Logo POLIS



Fuente: POLIS

El objetivo es mejorar el transporte local a través de estrategias integradas, tomando en cuenta los aspectos económicos, sociales y medioambientales. Para ello, POLIS apoya el intercambio de experiencias y la transferencia de conocimientos entre las autoridades locales y regionales europeas.

POLIS promueve la cooperación y asociación europea con el objetivo de facilitar el acceso a la investigación y a la innovación en el transporte a las ciudades y regiones. La red y su secretariado apoyan activamente la participación de los socios de POLIS en proyectos europeos y además participa como asociación en muchos otros.

Los encargados de tomar las decisiones en materia de transporte en las ciudades y regiones miembro son provistos con la información y las herramientas necesarias para hacer de la movilidad sostenible una realidad. En el grupo político de POLIS ediles de diferentes ciudades y regiones formulan recomendaciones para las instituciones europeas.

Un Enfoque Integrado

Las actividades de POLIS están estructuradas en cuatro temas principales (“los pilares temáticos”) del transporte urbano y regional sostenible:

- Medio ambiente y Salud
- Movilidad y Eficiencia del Tráfico
- Seguridad Vial y de los Sistemas de Transporte
- Aspectos Económicos y Sociales del transporte

Los socios de POLIS se reúnen regularmente en grupos de trabajo organizados en el marco de estos pilares. POLIS abarca ciudades y regiones de toda Europa. La red está actualmente presidida por Barcelona y tiene una sede permanente en Bruselas.

2.3.5 El Centro para Transporte Sostenible - Canadá

El Centro para Transporte Sostenible (CST - The Centre for Sustainable Transportation) [11] fue fundado en Toronto, Ontario en 1996. Actualmente opera en Manitoba y es una parte integral de la Universidad de Winnipeg, un importante núcleo universitario dedicado a los principios del desarrollo sostenible.

Figura 8. Logo CST



Fuente: The Centre for Sustainable Transportation

Por definición propia, el CST es capaz de conectar las partes interesadas y facilitar un cambio real en el mundo según los siguientes objetivos:

- Educar y sensibilizar sobre la necesidad de un transporte sostenible a través de las publicaciones y materiales de educación para estudiantes y profesionales del transporte, a través de seminarios, el desarrollo de planes de estudios y conferencias.
- El desarrollo de un consenso nacional sostenible basado en el marco de investigación de transporte y el programa para generar información sólida.
- Ofrecer liderazgo en las orientaciones estratégicas sobre aspectos relacionados con la circulación de bienes y personas, como el logro de los objetivos de Kioto de Canadá, la transición de la fuerza laboral y el futuro de la industria del transporte de mercancías, etiquetado y certificación.

El CST tiene varios proyectos en curso y algunos ya terminados, a continuación se presentan los más destacados:

- Blue Mountain Project
- WinSMART

- OttoCYCLE
- ecoDriver Manitoba
- Kids on the Move – Fases 1 y 2
- Child Friendly Transportation Planning

El CST es también el promotor de la primera “Ciclovía” [12], un evento inspirado por la campaña de mismo nombre originada en la ciudad de Bogotá (Colombia) y propuesta por Enrique Peñaloza. De esta manera, se constituyó la primera iniciativa oficial de este tipo en todo Canadá.

2.3.6 EMBARQ – A nivel Mundial

EMBARQ es el Centro para Transporte Sostenible (CST) del World Resources Institute². Desde 2002 EMBARQ ha venido creciendo y ahora integra cinco centros ubicados en México, Brasil, India, Turquía y los Andes. La idea del EMBARQ es la implementación de soluciones sostenibles a problemas de movilidad urbana.

Estos cinco centros coordinan el trabajo de todas las ciudades miembros de EMBARQ:

Arequipa – Perú, Bangalore – India, Curitiba – Brasil, Delhi – India, Guadalajara – México, Hanói – Vietnam, Indore – India, Estambul – Turquía, Ciudad de México– México, Mumbai – India, Porto Alegre – Brasil, Pune – India, Querétaro – México, Recife – Brasil, Rio de Janeiro – Brasil, Santiago – Chile, Shanghai – China, Washington D.C – USA, Xi’an – China.

Estos centros trabajan junto a las autoridades de transporte locales para reducir la contaminación, mejorar la calidad de vida de las personas y para crear espacios públicos seguros, accesibles y atractivos. Esta red emplea más de 60 expertos en campos que van desde arquitectura a gestión de la calidad del aire; geografía a periodismo; y desde sociología hasta ingeniería civil y de transporte.

² WRI es un importante instituto que intenta encontrar maneras prácticas para mejorar la calidad de vida de las personas y al mismo tiempo proteger el medio ambiente. Fue creado en 1982 y cuenta con numerosos proyectos en diversas áreas. <http://www.wri.org/>.

Figura 9. Logo EMBARQ



Fuente: EMBARQ

Objetivos

La idea del EMBARQ es hacer de las ciudades un mejor sitio para vivir enfocados en el transporte, para ello define los siguientes objetivos:

- Reducir el uso de combustibles, polución y emisiones de gases de efecto invernadero.
- Mejorar la calidad y eficiencia del transporte urbano.
- Mejorar la salud pública.
- Mejorar la accesibilidad y la seguridad en la vía.
- Mejorar la calidad de los espacios públicos y garantizar el acceso a los beneficios de la ciudad a todos sus miembros.
- Incrementar la competitividad de las ciudades.
- Dar mayor oportunidad a los negocios de movilidad sostenible.

2.3.7 Otros Proyectos e Iniciativas

Como se ha visto, son numerosas las organizaciones que han sido creadas para atacar diferentes problemas de la movilidad. Otras, por su parte, son redes de cooperación entre ciudades que si bien se ocupan de diversos temas, dedican parte de sus investigaciones a varios aspectos relacionados con movilidad sostenible. Existen también proyectos educativos dedicados a la divulgación de información y concientización de los ciudadanos, otro de los puntos importantes en toda la estructura de movilidad sostenible.

Se dan a continuación algunos nombres de otras organizaciones, proyectos y/o iniciativas que pueden ser de utilidad, sin embargo, se deja a disposición y de acuerdo al interés del lector la profundización en los alcances, objetivos y resultados de cada una de ellas.

2.3.7.1 Victoria Transport Policy Institute

El VTPI es una organización de investigación independiente con sede en Victoria, Columbia Británica, Canadá. Está dedicada al desarrollo de soluciones innovadoras y prácticas a los problemas de transporte. En su sitio web oficial se encuentran una variedad de recursos disponibles para ayudar a mejorar la planificación del transporte y análisis de políticas [13]. Entre ellos, una completa biblioteca de Gestión de la Demanda de Transporte (TDM Encyclopedia) que recopila numerosos artículos sobre el tema.

2.3.7.2 EUROCITIES

Una de las mayores asociaciones de ciudades europeas. Fue creada en 1986, en ese entonces contaba con 6 ciudades miembro, actualmente la red reúne a los gobiernos locales de más de 130 grandes ciudades en más de 30 países europeos. EUROCITIES proporciona a sus miembros una plataforma en la que se pueden compartir conocimientos e ideas, intercambiar experiencias, analizar problemas comunes y desarrollar soluciones innovadoras, a través de una amplia gama de foros, grupos de trabajo, proyectos, actividades y eventos.

EUROCITIES está comprometida con un futuro sostenible en el que todos los ciudadanos puedan disfrutar de una buena calidad de vida. Este año inicio la campaña llamada “European Green Capital”. Estocolmo fue la ganadora. La idea es que cada año se concederá el premio a la ciudad que use los más altos estándares ambientales, que esté comprometida permanentemente con la mejora del medio ambiente y desarrollo sostenible tomando decisiones innovadoras, y que pueda actuar como un modelo para inspirar a otras ciudades y promover las mejores prácticas a nivel europeo [14].

2.3.7.3 European Platform On Mobility Management - EPOMM

EPOMM es la Plataforma Europea para Gestión de la Movilidad, una red de países europeos que se dedican a la gestión de la movilidad (MM). EPOMM está estructurada como una organización internacional sin fines de lucro con sede en Bruselas [15].

2.3.7.4 PROCEED

PROCEED (Principios para la operación y el desarrollo de un transporte público de alta calidad) [16] es financiado por la Comisión Europea y tiene por objeto encontrar cómo los operadores de transporte público pueden mejorar su atractivo para los usuarios y al mismo tiempo mejorar su eficiencia.

Sus investigaciones se basan en cuatro importantes principios para el sistema de transporte público:

- Rápido y fiable

- Estructura simple
- Vehículos atractivos
- Buena información

El objetivo final es elaborar directrices prácticas que incluyan las experiencias más importantes, destinadas a ayudar la planificación de transporte público.

2.3.7.5 Travelmatters

TravelMatters es un recurso educativo. Un sitio web para aquellos interesados en aprender más acerca de cómo los hábitos de viaje y las opciones de transporte afectan el cambio climático global. TravelMatters ofrece un trío de recursos interactivos: calculadoras de emisiones, mapas en línea de las emisiones, y un amplio de contenido educativo para subrayar la estrecha relación entre los sistemas de transporte más eficientes y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [17].

A lo largo de esta sección, se evidenciaron los grandes esfuerzos que se hacen en todo el mundo en busca de una movilidad sostenible. Todos los proyectos e iniciativas arrojan como resultados diferentes prácticas y experiencias que tienden a una solución del problema global de movilidad. Estas experiencias son divulgadas en artículos, reportes anuales, conferencias, foros, entre otros. Dichos resultados pueden ser consultados por cualquier persona en los sitios web de cada proyecto y la idea siempre es el intercambio de *mejores prácticas*. De esta manera se están divulgando las mejores estrategias que ya han sido implementadas en ciudades alrededor del mundo y constantemente se está incentivando la innovación.

2.4 OBSERVATORIO DE MOVILIDAD VIAL

En general, los observatorios son herramientas que fundamentalmente persiguen la caracterización del elemento de análisis y su evolución a lo largo del tiempo, detectando las variables determinantes y sus tendencias. En este sentido, el Observatorio de Movilidad Vial intenta caracterizar este fenómeno en la ciudad de Pereira mediante la apropiada adquisición de información.

Dentro de la movilidad vial, el mayor reto se presenta a la hora de tener toda la información necesaria para generar nuevas estrategias que tiendan a mejorar el sistema de transporte urbano. También es necesario tener un proceso de retroalimentación que permita hacer una evaluación exhaustiva de las estrategias adoptadas y corregir posibles errores.

2.4.1 Objetivos

Como metodología, se escoge un conjunto de indicadores de tal forma que su análisis permita alcanzar ciertos objetivos básicos dentro del observatorio.

2.4.2 Modelar el Tráfico

Al medir las variables más relevantes se busca tener la información suficiente para caracterizar y modelar tanto espacial como temporalmente el tráfico de Pereira. Este será el primer modelo que exprese de forma aproximada la realidad de este fenómeno en la ciudad. Sobre dicho modelo se podrá hacer planeación, de manera que los datos obtenidos sean confiables pero sin correr el riesgo de experimentar directamente sobre la malla vial.

2.4.3 Simulación

Al tener un modelo que representa de forma aproximada la dinámica del tráfico de la ciudad de Pereira se podrán realizar algunas tareas que antes eran imposibles:

- Estudiar y evaluar sobre el modelo como pueden afectar la movilidad de la ciudad los posibles cambios en la estructura de la malla vial.
- Idear y simular un sin número de estrategias y políticas que tiendan a mejorar la movilidad de la ciudad, de manera que se pueda conocer a priori los posibles impactos generados y, al mismo tiempo, evaluar su viabilidad de implementación.
- Generar eventos inesperados y perturbaciones sobre el modelo para ver cómo responde el sistema y, de ser necesario, tomar las correcciones adecuadas.

2.4.4 Seguimiento y Evaluación de Políticas.

Son muchas las políticas y estrategias existentes que se han implementado en diferentes ciudades para buscar mejorar la movilidad en cada caso. Sin embargo, la gran diversidad de políticas y los múltiples orígenes de las mismas no garantizan el adecuado funcionamiento en todas las ciudades, aun cuando éstas hayan probado servir en ciertos ámbitos. Esto se debe precisamente a que el éxito de cada estrategia puede estar asociado a condiciones de infraestructura, fenómenos culturales u otros propios de la región de origen.

Al tener un sistema de medición automático y en tiempo real, es posible realizar una evaluación exhaustiva de cómo una nueva estrategia afecta realmente el tráfico vehicular en la ciudad y de cómo evoluciona el comportamiento del mismo a través del tiempo, identificando así los aspectos positivos y negativos de cada estrategia analizada.

Es necesario tener en cuenta que las estrategias adoptadas primero deben pasar un proceso de evaluación sobre el modelo, ya que experimentar sobre la malla vial directamente puede traer graves consecuencias.

2.4.5 Sistema de Semaforización

La arquitectura de la solución propuesta permite desarrollar un sistema de semaforización completamente adaptativo, con el fin de responder así, a los cambios de demanda que se pueden presentar en diferentes horarios o en situaciones fortuitas. Este punto es uno de los de mayor impacto, ya que la optimización de los tiempos permite un mejor flujo de los vehículos, con todas las implicaciones económicas, sociales y ambientales que ello conlleva.

2.4.6 Análisis Comparativo (Benchmarking).

El tener indicadores propios y sustentados con cifras reales del estado y comportamiento de la movilidad en la ciudad permite hacer comparaciones con otras ciudades en diferentes partes del mundo. Luego, como todo proceso de benchmarking, esta comparación trae consigo una retroalimentación vital para la mejora continua de los procesos y estrategias de gestión del tráfico en la ciudad.

2.4.7 Identificación de buenas prácticas.

El problema de la movilidad vial es específico en cada ciudad, sin embargo, es posible identificar algunos aspectos comunes. Congestión, gases de efecto invernadero, ruido y contaminación, problemas de salud, seguridad personal y accidentalidad son problemas que se encuentran en todas las ciudades, y por ello es posible encontrar soluciones

también comunes. Muchos de los proyectos en movilidad a nivel mundial están centrados en buscar mejores prácticas que se constituyan en los primeros métodos a implementar para contrarrestar las dificultades.

Adoptar o generar nuevas estrategias y evaluar su impacto real en la movilidad permite, entre otras cosas, identificar cuáles son las que realizan mejores aportes. Luego es posible clasificar aquellas que pueden ser aplicadas en casi cualquier contexto y de esta manera publicarlas y comunicarlas con sus respectivos resultados para fomentar su implementación en otras ciudades.

2.4.8 Fortalecimiento de la participación.

Como se ha visto, existe un sin número de organizaciones dedicadas al intercambio de mejores prácticas en materia de movilidad, en donde se pueden hacer grandes contribuciones y extraer otras para beneficio propio de la ciudad.

A nivel mundial se publican artículos, boletines, enciclopedias y un sin número de recursos con el fin de dar a conocer como se está enfrentando el problema de movilidad y los resultados obtenidos. También se realizan foros, congresos, conferencias, etc. que se convierten en puntos de encuentro globales para generar una discusión amplia en cuanto a movilidad sostenible.

La implementación de un observatorio de movilidad vial le abre las puertas a la ciudad de Pereira para entrar a beneficiarse de toda la experiencia de las grandes organizaciones, proyectos e iniciativas y participar de manera activa en los mismos.

2.4.9 Soporte a la toma de decisiones.

Lo que no se conoce no se puede gestionar. Es necesario conocer a fondo las características propias del tráfico vehicular y como diferentes eventualidades afectan el comportamiento del mismo. Todo esto, con el fin de idear nuevas estrategias que permitan mejorar la movilidad vial en las ciudades, para lo cual es ideal tener un soporte de datos históricos que respalden las decisiones tomadas.

Como se ha visto hasta ahora, existen un sin número de instituciones dedicadas a “observar” los diferentes comportamientos del transporte urbano en múltiples ciudades alrededor del mundo. Dichas instituciones se dedican entonces a generar y poner en práctica nuevas estrategias o adoptar otras que según la experiencia han mejorado la movilidad vial en diferentes ciudades. Luego con un buen soporte tecnológico es posible medir el impacto real de estas estrategias y decidir cuáles son las que mejor se acoplan a las necesidades de la ciudad de Pereira.

El Observatorio de Movilidad Vial permite ilustrar distintos aspectos que inciden directamente sobre este fenómeno, conociendo a fondo las variables medidas se puede generar un análisis orientando al debate e incentivar la participación activa de los distintos actores generando soluciones incluyentes.

2.5 ESTADO DEL ARTE

2.5.1 Barómetro EMTA

Un conocimiento preciso de la realidad es un requisito previo para definir las políticas pertinentes. Esto es particularmente cierto en el ámbito del transporte público, cuando las decisiones afectan la vida cotidiana de millones de personas y donde los costes de inversión y operación de sistemas complejos constituyen grandes inversiones económicas [18].

En este contexto, la comparación de datos entre diferentes territorios que afrontan los mismos tipos de problemas ("benchmarking") es una fuente útil de información para los tomadores de decisiones. El Barómetro de la EMTA de transporte público en las áreas metropolitanas europeas tiene como objetivo proporcionar una visión comparativa de los mismos.

En cada una de sus ediciones se ilustra la diversidad de los sistemas de transporte público y las políticas que lo rigen en las ciudades más grandes de Europa. Veinticuatro áreas metropolitanas han contribuido en la última edición del Barómetro EMTA de transporte público, el suministro de datos basados en el año 2006 y publicado en 2009.

El Barómetro presenta los resultados absolutos y desarrolla una serie de indicadores que permiten observar en términos relativos la situación de las distintas áreas metropolitanas participantes. El informe muestra los datos obtenidos a partir de un cuestionario, luego se hacen comparaciones y establecen relaciones, por lo que se convierte en una fuente útil de información para comprender las diferentes realidades de cada autoridad de transporte.

Figura 10. European Metropolitan Transport Authorities



Fuente: EMTA.

Sin embargo, luego de sus cuatro ediciones se han identificado algunas dificultades metodológicas en la recopilación de los datos para elaborar el informe, entre ellas se destacan:

- La definición de los indicadores no son los mismos en muchas ciudades y países.
- La disponibilidad de datos es muy heterogénea en función de las ciudades, y a veces incluso entre modos en la misma ciudad.
- Incluso cuando los datos existen, es raro que una sola organización los tenga todos. Su recopilación por lo tanto requiere una gran cantidad de trabajo
- La comparación de los datos es un ejercicio difícil ya que requiere contextos comparables. Esto significa que el análisis de las cifras en bruto debe considerar cuidadosamente los factores geográficos, institucionales y la realidad social detrás de los nombres de los territorios, para poder sacar algunas conclusiones.

2.5.2 Observatorio de Movilidad Metropolitana - España

El Observatorio de la Movilidad Metropolitana (OMM) [19] es una iniciativa de análisis y reflexión constituida por las Autoridades de Transporte Público (ATP) de las principales áreas metropolitanas españolas, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, y el Ministerio de Fomento, con el objeto de reflejar la contribución del transporte público a la mejora de la calidad de vida y del desarrollo sostenible en las ciudades. Está permanentemente abierto a otras ATP que puedan constituirse e incorporarse en el futuro. Colaboran también en el OMM otras instituciones u organismos, como RENFE, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (I.D.A.E.), la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE), la Asociación de Transportes Urbanos Colectivos (ATUC), la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) y los sindicatos (CC.OO.).

Desde su creación en 2003, el OMM viene recopilando información sobre la movilidad en un conjunto creciente de las principales ciudades españolas: 16 en la actualidad. El objetivo final es disponer de información fiable para la toma de decisiones para mejorar el transporte público urbano y metropolitano.

Figura 11. Observatorio Movilidad Metropolitana - España



Fuente: TRANSyT

El OMM resume y analiza los indicadores esenciales de movilidad en las diferentes áreas metropolitanas integrantes, así como describe el papel que desempeñan las ATP en la consecución de un transporte público atractivo y de calidad. En el Observatorio se articula en forma de indicadores sobre la caracterización de la movilidad, la oferta y demanda de transporte, la financiación del transporte público, la calidad ambiental y la difusión de buenas prácticas en el conjunto de las ciudades participantes.

Este esfuerzo ha sido eficaz y en todas las ciudades ha habido un neto crecimiento de los viajes en transporte público, aunque también han crecido los realizados en coche.

El Observatorio Metropolitano de la Movilidad constituye un foro de reflexión para mejorar la gestión sostenible del transporte público, mediante el intercambio de experiencias y buenas prácticas, y para difundir la contribución de este transporte a la mejora ambiental y la calidad de vida, desde una visión integradora del desarrollo urbano sostenible.

En abril de 2008 el Centro de Investigación del Transporte TRANSyT de la UPM [20] en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia realizaron el evento "Observatorio de la Movilidad Urbana. Comparación España y Colombia" en la ciudad de Bogotá (Colombia). Esta Jornada, se realizó en el marco de un proyecto de cooperación entre el Instituto de Investigación en

Transporte - Transyt de la Universidad Politécnica de Madrid - España y las dos universidades colombianas. El objetivo principal era dar a conocer las experiencias europeas sobre la realización de este tipo de acciones y establecer estrategias de cooperación con ciudades colombianas, para promover herramientas de evaluación, comparación y promoción de las mejores prácticas en el ámbito del transporte, el tránsito y el medio ambiente.

Figura 12. Centro de Investigación del Transporte TRANSyT



Fuente: TRANSyT

El objetivo final del proyecto es la creación de un Observatorio de la Movilidad en Colombia al estilo del existente en España, que permitiría, como resultado final la comparación de la movilidad entre las ciudades que conforman el Observatorio español y las que participen en el colombiano.

2.5.3 OMV - Caso Bogotá (Colombia)

La Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) mediante la Dirección de Veedurías y en convenio con la Universidad de los Andes creó el Observatorio de Movilidad Vial (OMV) en 2007, con el propósito de perfeccionar la información y el conocimiento integral de las autoridades, de los empresarios y de la comunidad en general sobre el comportamiento del transporte urbano en Bogotá [21].

El observatorio presenta, describe y analiza una serie de indicadores en materia de movilidad y nace con una visión de expansión a lo largo del tiempo que involucra los ámbitos regionales, andinos y latinoamericanos. El Observatorio espera convertirse en una fuente de información de primer orden para los entes y para la ciudadanía en general. La presente publicación agrupa los diferentes indicadores en cinco áreas:

- **Demanda.** Características de los viajes en Bogotá y reparto modal.
- **Oferta.** Características de operación e infraestructura del transporte público y privado.
- **Sostenibilidad.** Indicadores de accidentalidad y calidad del aire.
- **Aspectos financieros.** Fuentes financiación para la malla vial, distribución de presupuestos, aspectos tarifarios y costos.
- **Percepción sobre aspectos de movilidad.** Se presentan resultados de encuestas de percepción con respecto a demoras, estado de la malla vial, señalización, control, cultura ciudadana, calidad del aire, facilidad para desplazarse, etc.

Figura 13. Observatorio de Movilidad Urbana Bogota



Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

Como se vio antes, la ciudad de Bogotá ha trabajado en conjunto con el Observatorio de Movilidad Metropolitana de España, esto ha permitido el fortalecimiento de sus medidas en cuestiones de movilidad, logrando grandes avances en este campo. En 1998 se inició un gran proyecto integrado de transporte masivo, la construcción de un sistema basado en vehículos articulados denominado como Sistema de Transporte Masivo del Tercer Milenio "TransMilenio". Se ha construido además la red de ciclovías más extensa de Latinoamérica, para promover el transporte alternativo y reducir el uso del automóvil. Y este año se están realizando los procesos de licitación para la construcción del Metro de Bogotá. Todo esto ha llevado a que Bogotá sea ahora un punto de referencia para otras ciudades en todo el mundo, demostrando así su compromiso con la movilidad sostenible.

2.6 OMV – CASO PEREIRA

2.6.1 Introducción

En el Plan Integral de Movilidad Metropolitana en el Territorio de los Municipios que conforman el Área Metropolitana Centro Occidente (AMCO) realizado en 2006 [22], se propuso realizar un Observatorio de Movilidad Vial con un proyecto denominado “El aprendizaje institucional que permita la conformación de un observatorio de la movilidad”. Además, el estudio propuso otro proyecto de carácter tecnológico denominado “Sistema de Información de Movilidad Metropolitana”, cuyo objetivo sería diseñar y poner en marcha un sistema de información geográfica y estadística de la movilidad. Sin embargo, hasta ahora, en la ciudad de Pereira no se había iniciado ninguno de los dos proyectos o alguno parecido.

El OMV que actualmente está en desarrollo, es una idea del Grupo de Investigación Sirius de la Universidad Tecnológica de Pereira y cuenta con el apoyo y cofinanciamiento de COLCIENCIAS. La Coordinadora Académica de Transporte de la Universidad Nacional en su presentación en la Primera Jornada Internacional sobre Observatorio de la Movilidad Urbana [23] afirma que *Las instituciones académicas, dada su naturaleza, están en capacidad de apoyar al sector público en la consolidación de instrumentos de política como son los observatorios de movilidad*. Este OMV es un ejemplo más donde las universidades son pioneras en iniciativas de este tipo.

Precisamente, con este proyecto se demuestra una efectiva interacción entre la Universidad Tecnológica de Pereira a través de su Grupo de Investigación Sirius, el Instituto Municipal de Tránsito de Pereira y COLCIENCIAS, para la generación y transferencia de ciencia, tecnología e innovación a la sociedad.

Por otra parte, el proyecto presentado por el Grupo de Investigación Sirius, desea integrar los componentes necesarios para dar todo un soporte tecnológico al Observatorio de Movilidad Vial. Esta decisión se toma partiendo del hecho de que un soporte tecnológico adecuado permitirá una mejor adquisición de datos y por tanto una mejor toma de decisiones.

Retomando las conclusiones de la Coordinadora Académica de Transporte de la Universidad Nacional [23] en donde afirma que Bogotá y en general las ciudades colombianas, han ganado un liderazgo importante en la recopilación de información primaria de movilidad. Sin embargo, no se mantienen bases de datos y sistemas de información dinámicos, que permitan apoyar el proceso de toma de decisiones tanto en escala local como nacional por lo que se evidencia dicha necesidad de convergencia en la solución para el OMV.

Figura 14. Grupo de Investigación Sirius



Fuente: Grupo de Investigación Sirius

2.6.2 Características Principales

El Observatorio de Movilidad Vial propuesto por el Grupo de Investigación Sirius tiene como objetivo principal brindarle a las ciudades, y en particular a sus secretarías de tránsito y de planeación, un sistema que permita medir, procesar y almacenar las principales variables del tráfico de la malla vial, tal que a partir de información continua, se pueda caracterizar y modelar tanto espacial como temporalmente el sistema de tráfico.

Este sistema permitirá optimizar los procesos de proyección urbana, planeación y simulación de estrategias para mejorar los índices de movilidad y, a su vez, se facilitarán los procesos de medición y evaluación del impacto real de dichas estrategias y políticas implantadas. Además, por la estructura de la solución propuesta se podrá hacer sincronización de tiempos de semáforos acordes a las variaciones de las demandas de tráfico a través del tiempo. Adicionalmente, gracias a que la información se transmite en tiempo real a un centro de gestión, se podrán efectuar acciones inmediatas ante sucesos inesperados.

2.6.3 Esquema General

En el modelo propuesto se pueden observar cuatro componentes bien diferenciados: un sistema embebido, una red de comunicación, un sistema centralizado de información y un sistema de visualización.

2.6.3.1 Sistema Embebido

Sistema embebido de alto desempeño basado en cámaras, estrategias de visión por computador y procesamiento digital de imágenes que permita extraer del video tomado en tiempo real las principales variables del tráfico.

Este sistema sensor está conformado por una cámara basada en sensor CMOS de alta resolución que permite obtener imágenes en tiempo real de una intersección dada. A continuación la información de las imágenes es transferida a un sistema de procesamiento embebido de alto desempeño y mediante técnicas de visión por computador, realizar una clara identificación de los vehículos, de tal forma que se puedan cuantificar, clasificar y medir su velocidad promedio de los mismos.

El sistema embebido también codifica y transmite el video tomado en tiempo real y permite el uso de protocolo IP, permitiendo que el proceso de comunicación sea transparente entre los sistemas embebidos y las demás partes que conforman el sistema general.

Es precisamente esta parte del proceso la que concierne al presente trabajo. En capítulos posteriores se aclaran los conceptos de visión por computador y se analizan los algoritmos estudiados. Además, se darán las especificaciones necesarias en cuanto al hardware utilizado tanto en las cámaras como en los sistemas de procesamiento.

2.6.3.2 Red de Comunicación

Sistema de comunicación basado en redes MAN que permita la transmisión de la información en tiempo real del video y de las variables extraídas hacia el centro de gestión de tráfico proveniente de los sensores distribuidos en la ciudad.

2.6.3.3 Sistema de Información Geográfica

Para lograr una coherencia de la información muestreada con los puntos de intersección en los cuales ha sido tomada se necesita un sistema que contenga la cartografía del área urbana de la ciudad, que permita almacenar estas variables en puntos georeferenciados en tiempo real.

En este sentido se ha diseñado una *geodatabase* que no solo permite representar y llevar control sobre los diferentes dispositivos inmersos en el sistema, sino que al mismo tiempo se pueden conservar los históricos de los datos enviados por el sistema embebido, datos que van desde el estado de los semáforos en un momento dado, el conteo de carros e incluso las velocidades de éstos a la hora de pasar por el cruce.

En la actualidad se realizan pruebas de estrés con el fin de garantizar fiabilidad, disponibilidad, eficiencia y eficacia del sistema centralizado de información.

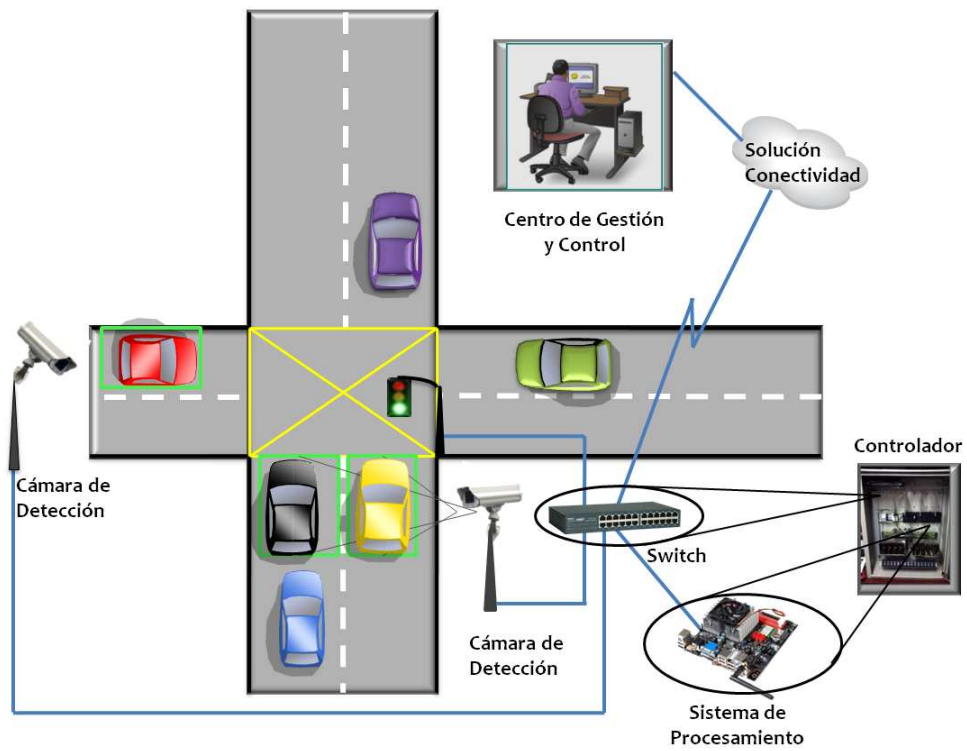
2.6.3.4 Interfaz de Visualización

Finalmente se tiene la necesidad de dotar al observatorio de movilidad de una interface amigable al usuario que permita visualizar la información del estado actual de las variables, que genere alarmas frente a emergencias programadas, que permita la visualización de los históricos de las variables y que disponga de la visualización del video de los diferentes puntos muestreados en tiempo real.

2.6.3.5 Interconectado de Componentes

El punto central de la comunicación es el controlador. En cada gabinete existe un switch que conecta cada una de las cámaras con su respectivo sistema de procesamiento. A través de él se puede acceder también al controlador electrónico de semáforos y programar los tiempos remotamente. Todo el sistema está conectado con el centro de control mediante un enlace de fibra óptica. En el centro de control se tendrán el Sistema de Información Geográfico y el sistema de visualización.

Figura 15. Esquema General OMV Pereira



Fuente: El autor

3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES DE TRÁFICO

3.1 INTRODUCCIÓN A LA VISIÓN POR COMPUTADOR

Dada la naturaleza multidisciplinaria de la visión por computador, es importante empezar por limitar el objetivo que se persigue con ella, ya que es realmente difícil entrar a definirla sin involucrarse en otros campos que guardan una estrecha relación con la misma.

Como lo plantean E. Trucco y A. Verri [24]:

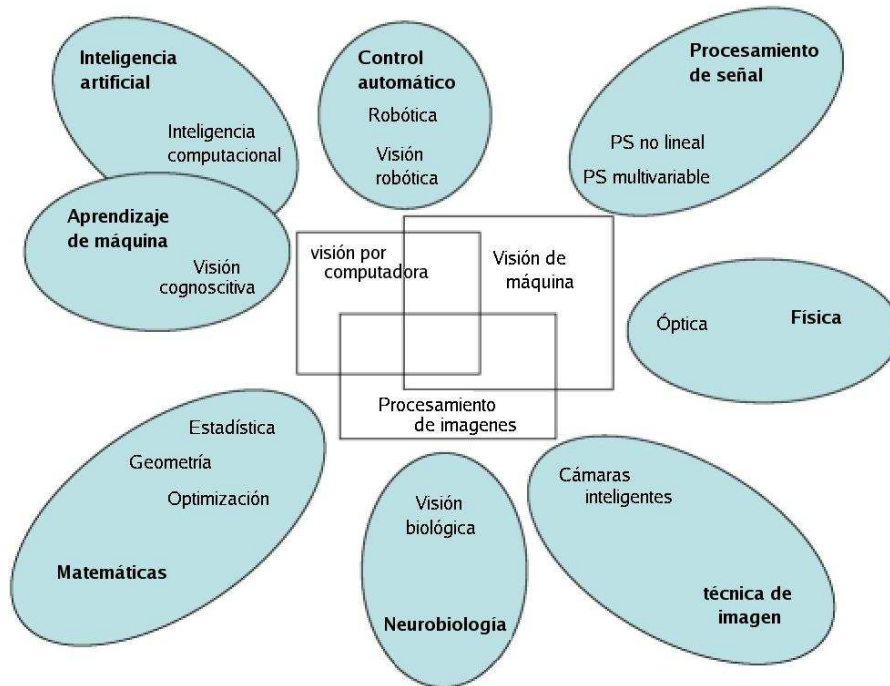
Las acciones o decisiones que la visión por ordenador intenta hacer sobre los datos de la cámara, se realizan en el contexto de un propósito o una tarea específica.

Por lo tanto, la siguiente busca hacer un pequeño aporte a la definición universal que aun está en discusión, además de ser la que mejor se adapta al objetivo del presente proyecto.

Visión por computador es toda una serie de operaciones matemáticas y técnicas algorítmicas aplicadas a un conjunto de imágenes, con el fin de interpretarlas y extraer de forma confiable, la información requerida según el objetivo planteado.

Según esto, la visión por computador puede relacionarse en campos como inteligencia artificial, robótica, procesamiento de señales, reconocimiento de patrones, neurociencia, teoría de control y muchos más, desempeñando tareas de reconocimiento, seguimiento de objetos, reconstrucción de escenas, restauración de imágenes, control de calidad, entre otros [25].

Figura 16. Relaciones entre visión por computador y otras áreas afines



Fuente: Wikipedia

3.2 HISTORIA

A continuación se presentan en orden cronológico los eventos más relevantes en visión por computador desde el año de 1955.

Tabla 1. Cronología Visión por Computador

Año	Evento
1955	Oliver Selfridge, padre de la percepción por computador describe el primer programa que aprendía y reconocía letras (Reconocimiento de Patrones) [49] [36]
1960	Mejoramiento de las imágenes espaciales a través de procesamiento de imágenes.
1965	Primer Sistema de Visión por computador: <i>Roberts' Program -- Blocks World</i> [37], paradigma 2D->3D.
1968	Primer edición de la revista oficial en Reconocimiento de Patrones [38]
1969	Primer Libro en Visión por Computador: <i>Picture Processing by Computer (A. Rosenfeld)</i> [39]
1970	Primera iniciativa de la International Conference on Pattern Recognition (ICPR) fundada después 1973. [40]
1977	Primera conferencia IEEE en Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [41]
1978	Se funda la Asociación Internacional de Reconocimiento de Patrones (IAPR) [42]
1979	Análisis y estimación del movimiento.
1980	Agentes Visuales, primer algoritmo de procesamiento de imagen [43]
1981	Métodos de Optical Flow (L-K y H-S)
1988	Avances en visión 3D. Surge un nuevo campo llamado Visión Activa [44] [45]
1990-2000	Estimadores de movimiento, fondos y posiciones, nuevos filtros en visión artificial (Kalman), face detection, machine learning, realidad aumentada [46], entre otros.
2000+	Visión Cognitiva [47], entre otros

Fuente: El autor

3.3 SISTEMAS DE VISIÓN POR COMPUTADOR

De forma general este tipo de sistemas se componen de una parte óptica, un componente de adquisición (sensor), y una parte de procesamiento, que se describirá a lo largo de esta sección. Su estructura puede variar según su objetivo, pero su funcionamiento se puede resumir en 5 etapas, que no necesariamente van en orden:

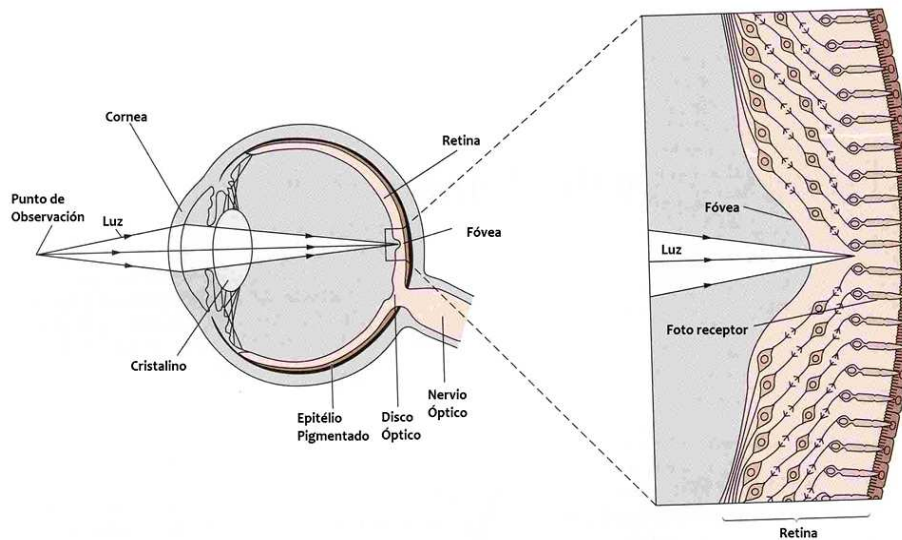
- Adquisición
- Pre-Procesado
- Extracción de características
- Segmentación

3.3.1 Percepción y Adquisición

Desde el punto de vista biológico, el proceso de percepción visual desarrollado por la mayoría de seres vivos, y específicamente en los humanos, empieza por la recepción de luz que viene del exterior, hacia un sensor comúnmente llamado “ojo”, cada rayo de luz es captado por un tejido sensible a ella, llamado “retina”, que a través de sus foto receptores (conos y bastones), transforma la luz en impulsos eléctricos llevados al cerebro mediante el nervio óptico, finalizando así, el proceso de percepción visual humana.

En el campo de la visión por computador el sistema de adquisición guarda estrecha relación con la forma biológica mencionada. En esta, el rayo de luz pasa a través de una lente y es capturado por un sensor electrónico (CMOS o CCD), el cual se compone de una malla de $N \times M$ foto sensores que toman el papel de conos y bastones, captando la intensidad del haz luz para que finalmente sea digitalizada por un convertidor de analógico a digital [24]. Conviene aclarar que, en primera instancia, cada foto receptor es sensible a la intensidad de luz y no a los colores, por lo que en éste se incluye un filtro de Bayer o un prisma que permita descomponerla en tres posibles colores básicos para cada pixel.

Figura 17. Recepción de luz por el ojo humano

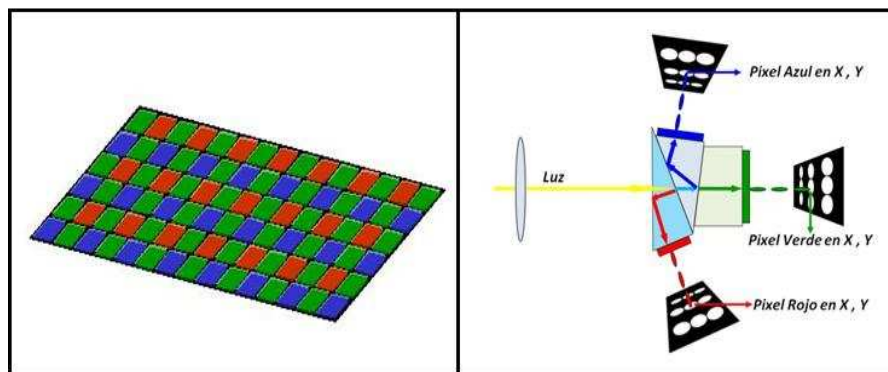


Fuente: University of Utha

3.3.1.1 Tipos de imagen

Ya adquirida la imagen, esta es representada por un arreglo en 2 dimensiones de tamaño $N \times M$ (N Filas, M Columnas), donde cada posición de la matriz es un pixel que toma un valor único, determinado por el tipo de sensor [24].

Figura 18. Filtro de Bayer (izquierda). Descomposición R, G, B, mediante prismas (Derecha).



Fuente: Sean McHugh Cambrigde in Color

En general la representación matricial () entendida por un sistema de procesamiento, puede ser de dos tipos según el sensor usado:

- **Imágenes de intensidad** (Decodificación de la intensidad de luz).
- **Imágenes de rango** (Decodificación especial de formas y distancia como sonares).

Para el desarrollo de este proyecto, se han usado imágenes de intensidad generalmente en RGB y escala de grises.

Figura 19. Percepción humana versus percepción maquina



Fuente: El autor

3.3.1.2 Óptica Básica, Sensores e Iluminación

Los conceptos básicos relacionados con el proceso de adquisición, como la lente, apertura, entre otros, hacen parte de cualquier sistema de visión por computador y son definidos a continuación:

- **Lentes:** Encargados de concentrar el haz de luz proveniente de la superficie del objeto observado, basados en los distintos grados de refracción que experimenta cada rayo de luz cuando choca sobre la superficie.
- **Distancia Focal:** Es la capacidad de hacer zoom sobre un campo de vista. Un lente con mayor distancia focal puede captar con mucho detalle la información de un punto de observación, mientras que con una menor, se puede tener un campo de visión mayor alrededor del punto de observación pero con un menor detalle del mismo.
- **Apertura:** Se refiere al tamaño del orificio de la lente, que afecta directamente a la cantidad de luz que entra al sensor.
- **Foto Sensor:** Circuito sensible a la luz que compone al sensor de adquisición (CMOS o CCD). Generalmente dentro de los sensores actuales existen millones de foto sensores distribuidos en un arreglo bidimensional de $N \times M$, encargados de medir la intensidad del haz de luz entrante basando su funcionamiento en el

efecto fotoeléctrico, convirtiendo la energía en un voltaje de referencia, que puede ser codificado por un convertidor de analógico a digital.

- **Radiometría:** Es la relación entre la cantidad de luz emitida desde una fuente de luz y el reflejo de la misma sobre la superficie de un objeto [24].
- **Tiempo de exposición:** Se define como el lapso de tiempo que el sensor permite captar luz a cada foto sensor, este tiempo es del orden de milisegundos.

3.3.2 Pre-Procesado:

Son una serie de tratamientos realizados sobre la imagen justo antes de ser llevada al sistema de procesamiento. Entre ellas, podemos encontrar la mejora de contrastes o la reducción del ruido que evita la introducción de valores erróneos por parte del sensor dentro de la imagen en el proceso de adquisición.

Figura 20. Captura con alta exposición (izquierda) versus captura con baja exposición (derecha).



Fuente: El autor

Figura 21. Imagen sin ruido (izquierda) versus imagen con ruido (derecha)



Fuente: El autor

3.3.3 Extracción de características:

En esta etapa generalmente se capturan propiedades de la imagen, desde líneas, bordes, puntos de interés hasta formas o comportamientos.

Figura 22. Características de la imagen encerradas en un círculo rojo



Fuente: El autor

3.3.4 Segmentación

Esta etapa corresponde al momento de decidir que partes de una imagen son relevantes, es decir, que parte necesita ser interpretada o analizada según el objetivo planteado [26], Este proceso puede dar como resultado mascarar o regiones de interés, usadas en el procesamiento de alto nivel.

3.3.5 Procesamiento de alto nivel

Para la última etapa, se procesan el grupo de datos de interés, los cuales pueden entrar en tareas como: estimación de forma o posición, clasificación, reconocimiento de patrones, entre otros.

3.4 CONCEPTOS Y OPERACIONES

La siguiente sección surge con el fin de aproximar al lector a las definiciones y operaciones básicas que existen alrededor de la visión por computador, y que han sido aplicadas a lo largo del presente proyecto.

3.4.1 Matrices

Dada la naturaleza bidimensional propia de una imagen digital, cuya representación es una matriz de tamaño $M \times N$. Es necesario definir los siguientes términos:

Matriz: es un conjunto de datos ordenados de forma rectangular:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

Donde cada valor a_{ij} es un elemento de la matriz o pixel de la imagen y es de dimensión $m \times n$.

Existen varios tipos de matrices como la matriz fila, compuesta por una sola fila de largo n :

Así mismo una matriz columna, que está compuesta por un vector columna de alto m :

3.4.2 Operaciones con Matrices

La siguiente sección pretende dar una breve introducción matemática sobre las operaciones lógicas y aritméticas que pueden ser aplicadas a una matriz.

3.4.2.1 Operaciones Matemáticas Básicas

Suma: Sean A y B dos matrices de una misma dimensión se define la suma de matrices como:

Donde:

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n$$

Resta: Sean A y B dos matrices de una misma dimensión se define la suma de matrices como:

$$C = A - B = A + (-B)$$

Donde:

$$c_{ij} = a_{ij} + (-b_{ij}) \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n$$

Producto Escalar: Sea una matriz A de $m \times n$ y λ un número real. Se define la operación como:

$$C = \lambda \cdot A$$

Donde:

$$c_{ij} = \lambda \cdot a_{ij} \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n$$

Producto de matrices: Sean dos matrices A, B, donde el número de columnas de A es igual al número de filas de B, se define la operación como:

$$C_{m \times p} = A_{m \times n} \otimes B_{n \times p}$$

Donde:

$$c_{ij} = \sum_{w=0}^n a_{iw} b_{wi}$$

3.4.2.2 Operaciones Lógicas Básicas

Además de las operaciones matemáticas básicas del álgebra lineal, podemos aplicar los operadores lógicos como:

(A ∧ B): Se define como la aplicación de la operación booleana AND entre la matriz A y B, ambas deben ser de la misma dimensión:

$$c_{ij} = a_{ij} \wedge b_{ij}$$

(A ∨ B): Se define como la aplicación de la operación booleana OR entre la matriz A y B, ambas deber ser de la misma dimensión:

Not (A): Se define como la aplicación de la negación a la matriz A de dimensión mxn, cada elemento de la matriz debe ser de tipo binario (0|1):

3.4.2.3 Kernel (Núcleo):

En matemáticas puede ser definido como un conjunto de coeficientes, dispuestos en una matriz mxm, los cuales cumplen la función de operadores de otra matriz de mayor tamaño, donde m es un número impar y el centro del kernel es llamado punto de anclaje.

Figura 23. Kernel de Sobel de 3x3, Punto de anclaje en (2,2)

1	-2	1
2	-4	2
1	-2	1

Fuente: Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library

3.4.2.4 Convolución

La convolución es una operación matemática realizada entre dos funciones, generando una tercera definida de la siguiente forma:

Su relación con visión por computador recae en su aplicación en dos dimensiones, donde la matriz imagen, es operada por otra matriz (kernel) con el fin de obtener alguna

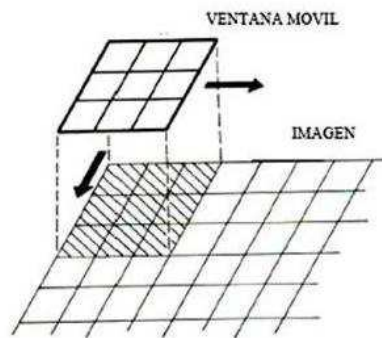
característica especial de la misma. Dicho proceso bidimensional consiste en multiplicar cada pixel de la imagen por su correspondiente en el kernel, para finalmente hacer una suma ponderada, este proceso se repite en cada pixel de la imagen moviendo el kernel horizontal y verticalmente.

Matemáticamente, la convolución entre una imagen de tamaño $N \times N$ y un kernel de tamaño $M \times M$, donde $N > M$, está definida por la siguiente expresión:

$$C(x, y) = \sum_{i=0}^{M_i-1} \sum_{j=0}^{M_j-1} I(x + i - a_i, y + j - a_j) G(i, j)$$

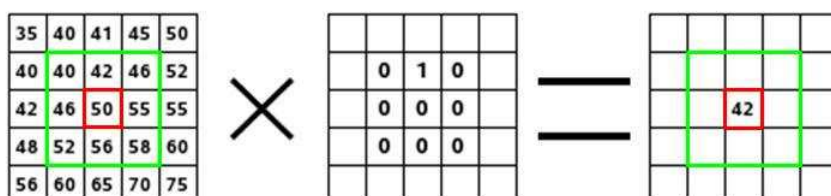
Donde $I(x, y)$ es el valor de la imagen en (x, y) , $G(i, j)$ es el valor del kernel en (i, j) y (a_i, a_j) son las coordenadas de anclaje del kernel, generalmente en el centro del mismo.

Figura 24. Desplazamiento de la ventana móvil (Kernel) sobre la imagen a procesar



Fuente: El autor

Figura 25. Convolución 2D



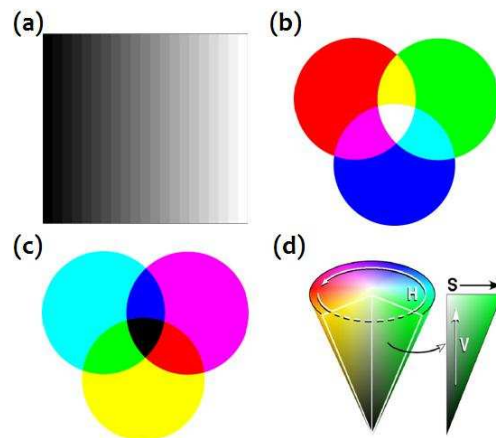
Fuente: El autor

Las operaciones con matrices son de vital importancia para el tratamiento de una imagen en visión por computador, las que se presentaron en esta sección son las mínimas necesarias para comprender el procesamiento que se desarrollara de aquí en adelante. Sin embargo, se invita al lector a profundizar sus conocimientos en este campo lo que le permitirá hacer una mejor apropiación del tema aquí tratado.

3.4.3 Espacio de Colores

Una imagen digital está compuesta por una matriz de puntos llamados píxeles (*picture element*), los cuales deben representar un color específico usando uno o más valores escalares, esta representación es llamada el espacio de colores. Por ejemplo, en la escala de grises se requiere un solo valor que representa la intensidad de luz, mientras que en el espacio RGB se requiere de un conjunto de 3 valores, donde cada uno representa individualmente la intensidad de luz roja, verde y azul [27].

Figura 26. Espacio de colores: (a) Escala de Grises (b) RGB (c) CMYK (d) HSV



Fuente: Sean McHugh Cambridge in Color

3.4.4 Procesamiento digital de Imágenes

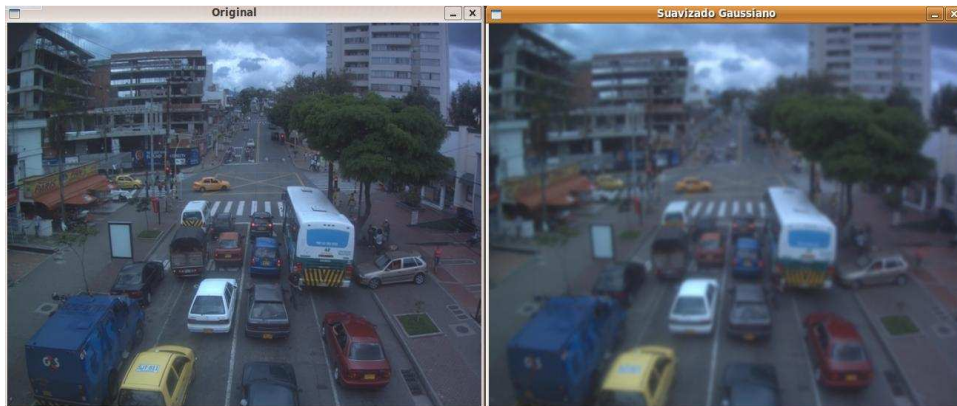
Definido como toda operación de alto nivel sobre una imagen que da como resultado una imagen similar o que contiene ciertas propiedades de la imagen inicial.

Entre las operaciones más comunes se pueden encontrar:

3.4.4.1 Suavizado

El proceso de suavizado consiste en promediar cada pixel de una imagen teniendo en cuenta a sus vecinos más cercanos, esta operación puede buscar reducir el ruido en una imagen o reducir el detalle de la misma. El promedio puede ser basado en métodos estadísticos como la media gaussiana o el filtro bilateral que no suaviza los bordes [28].

Figura 27. Imagen Original (izquierda) versus imagen suavizada usando media gaussiana de 11x11 (derecha)

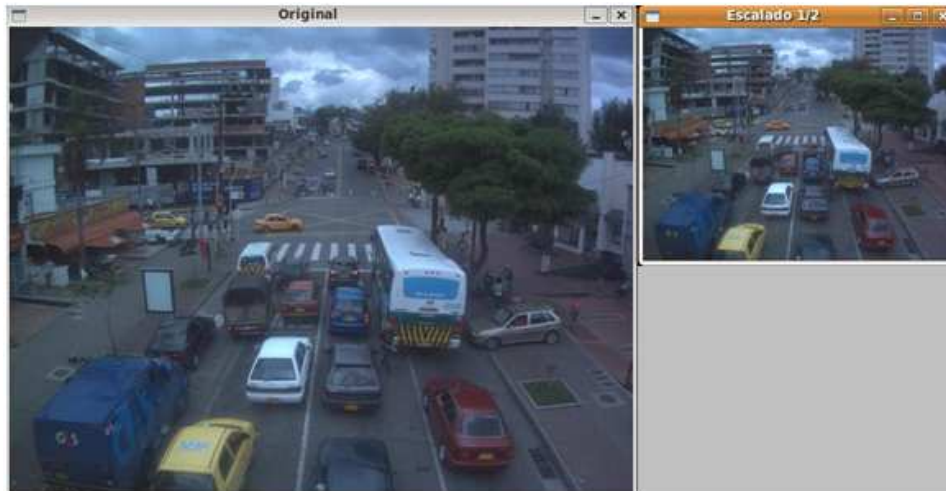


Fuente: El autor

3.4.4.2 Escalado de una Imagen

Es el proceso de reducción o aumento de tamaño de una imagen mediante una interpolación de píxeles vecinos, muestreo por área, entre otros.

Figura 28. Imagen original (izquierda) versus imagen escalada a la mitad (derecha)



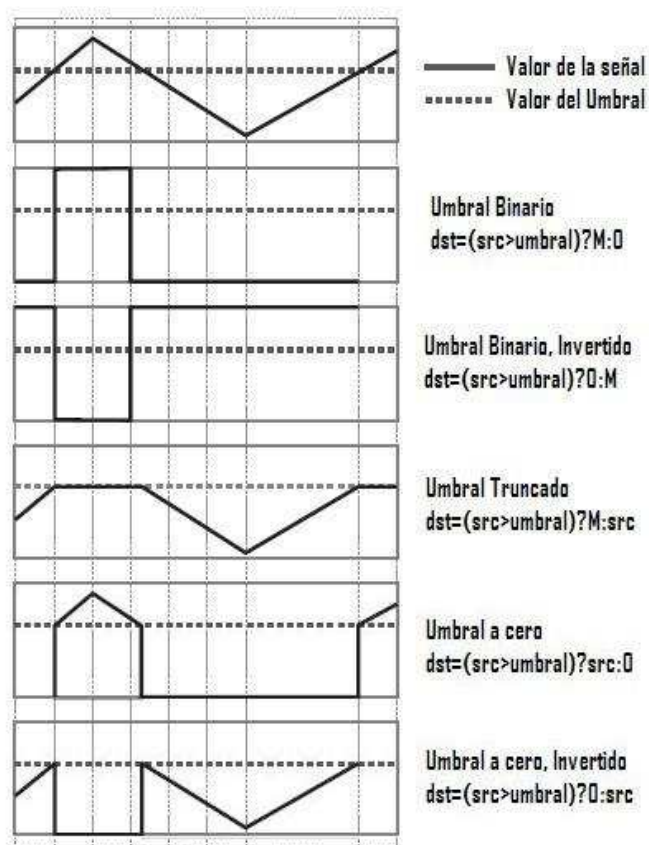
Fuente: El autor

3.4.4.3 Umbral

El umbral es un término muy común en el tratamiento de señales, que define el valor mínimo que debe tener una señal para ser conservada, aumentada o suprimida. En visión por computador, es el valor mínimo que debe tener cada un pixel de una imagen para que sea convertido en un valor binario (0|1), conservado, limitado, u otros según el caso.

Estudiando en forma detallada la imagen de la figura 29, se puede deducir fácilmente como funciona cada umbral.

Figura 29. Tipos de Umbral



Fuente: Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library

La Figura 30, muestra el resultado de la aplicación de los distintos tipos de umbralización sobre una imagen en escala de grises (un umbral solo funciona en un componente o canal).

Figura 30. Imagen tratada con un umbral mínimo de 85



Fuente: El autor

3.4.5 Operaciones morfológicas

Se definen como un conjunto de técnicas matemáticas usadas en el análisis de formas geométricas dentro de una imagen con el fin de representarla e interpretarla como conjuntos de datos [29]. Una morfología, como toda operación matemática, cumple con unas propiedades básicas tales como:

- **Traslación:** Una morfología no depende de las coordenadas donde es aplicada.
- **Invariante a las escalas:** Puede ser aplicada tanto en imágenes binarias que provienen de un umbral como de intensidad.
- **Localidad:** La morfología de un conjunto de píxeles depende únicamente de los vecinos del conjunto.
- **Semi-continua:** No presenta cambios abruptos.

Dentro de las operaciones más comunes se tienen:

Dilatación: Esta operación provoca un crecimiento progresivo del conjunto de datos tratado, es decir una expansión de los mismos hacia sus vecinos locales.

Erosión: Provoca una degradación progresiva del conjunto de datos, puede ser visto como el proceso inverso a la dilatación.

Apertura: Elimina los datos menos necesarios del conjunto de datos, puede ser usado para separar dos objetos que por alguna razón como ruido o vibración en la imagen, pueden compartir algún dato.

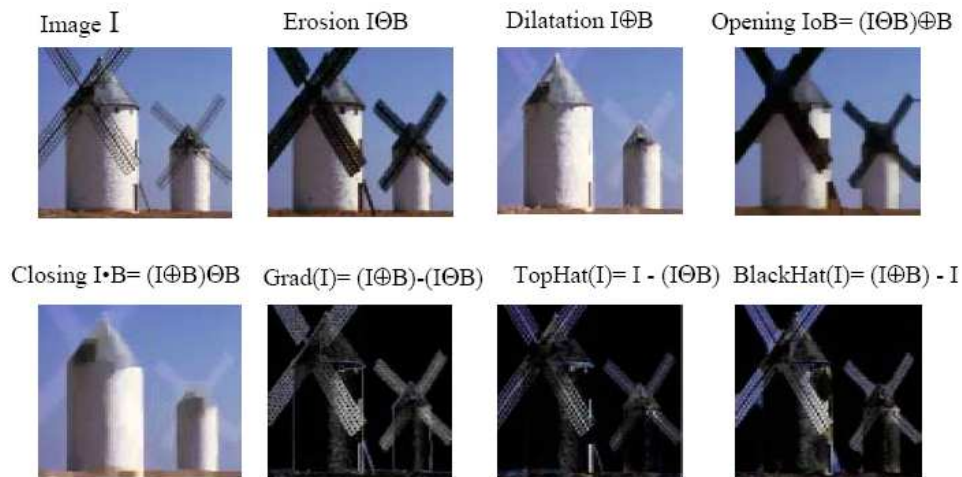
Cierre: Es usado para rellenar hoyos en un conjunto de píxeles, generalmente se usa conjuntamente con la erosión.

Gradiente: Esta operación difiere totalmente de calcular el gradiente, su nombre surge debido a que se puede ver que tan rápido cambia una intensidad en una región de la imagen.

Se invita al lector a indagar sobre las distintas morfologías no nombradas en la presente sección, como el TopHat, BlackHat, Acierta o Falla, entre otras.

Finalmente, en la figura 31 se ilustran varios ejemplos de las transformaciones morfológicas mencionadas.

Figura 31. Operaciones Morfológicas

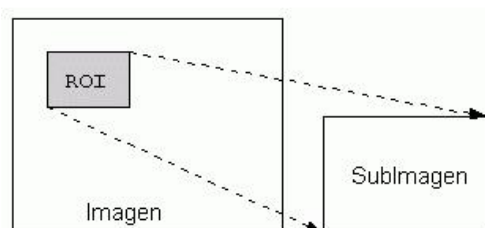


Fuente: Gary R Bradski, Ph.D. Vision, Graphics and Pattern Recognition Group. Intel Labs

3.4.6 Regiones de interés

Generalmente conocida con el nombre de ROI (Por sus siglas en ingles Region of Interest), su función básica es delimitar una región de la imagen original con un objetivo en particular en donde la parte restante no sea tomada en cuenta. De esta forma se pueden realizar operaciones en zonas específicas de la imagen.

Figura 32. Región de Interés (ROI)



Fuente: El autor

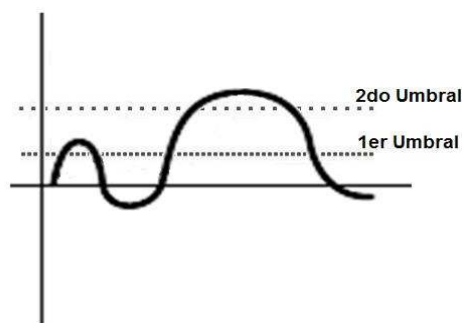
3.4.7 Transformación de una imagen

Son los métodos matemáticos encargados de dar una representación alternativa de los datos de una imagen con el fin de extraer información adicional de la misma, por ejemplo, la aplicación de la transformada de Fourier, que dejaría como resultado en cada pixel de la imagen, la información de su espectro en frecuencia.

Entre las transformaciones más comunes, se encuentran:

Función de Histéresis: Conocido como función de doble umbral, uno alto y uno bajo; se comporta como un algoritmo de búsqueda recursivo a lo largo de un vector, ya que encuentra aquellos pixeles que pasan el umbral alto y verifican que sus vecinos puedan ser posibles candidatos si y solo si pasan el umbral bajo.

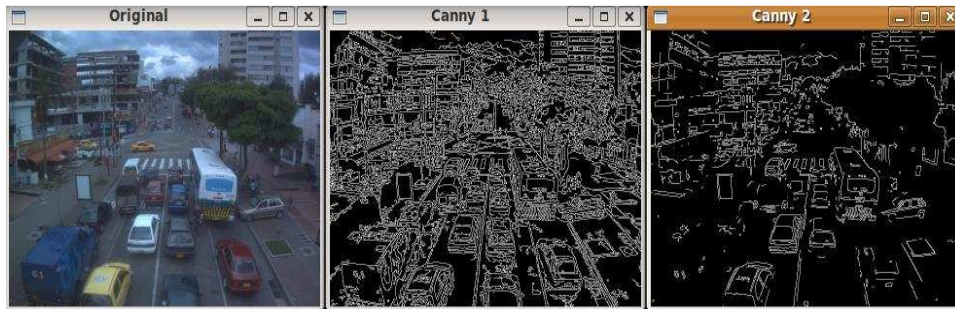
Figura 33. Umbral de histéresis



Fuente: El autor

Detector de Bordes de Canny: Es un algoritmo para detección de bordes de una imagen; su funcionamiento se rige por un suavizado gaussiano, luego se calcula el gradiente el cual entrega la magnitud y dirección de cada pixel, se hallan los máximos y estos son pasados a través de una función de histéresis, encargada finalmente de evaluar los candidatos a ser bordes.

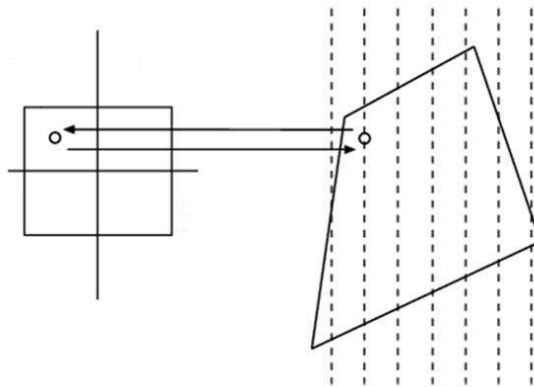
Figura 34. 34 Demostración del algoritmo de Canny con umbrales bajos (Canny 1) y altos (Canny 2)



Fuente: El autor

Transformación Geométrica: Es toda operación que permite crear una nueva figura a partir de una ya existente, en donde se escale una combinación lineal de las dimensiones. Algunas de las transformaciones geométricas más usadas son la rotación, perspectiva, entre otras.

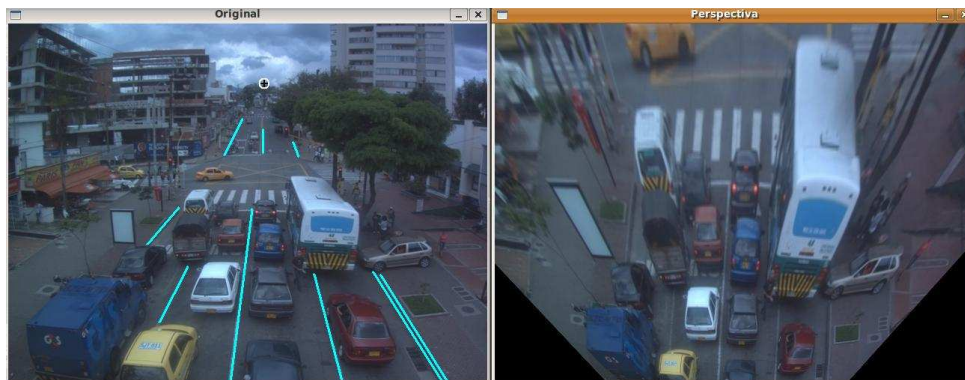
Figura 35. Transformación proyectiva (Rectángulo – Cuadrilátero)



Fuente: Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library

Uno de los procesos para medir la velocidad de un vehículo usa la perspectiva de una imagen [30]. En la cual se detecta el punto de fuga³ de la autopista y se procede al cálculo de la matriz proyectiva, esto con el fin de obtener una *vista de pájaro*.

Figura 36. Punto de Fuga e imagen perspectiva



Fuente: El autor

3.4.8 Segmentación de la imagen

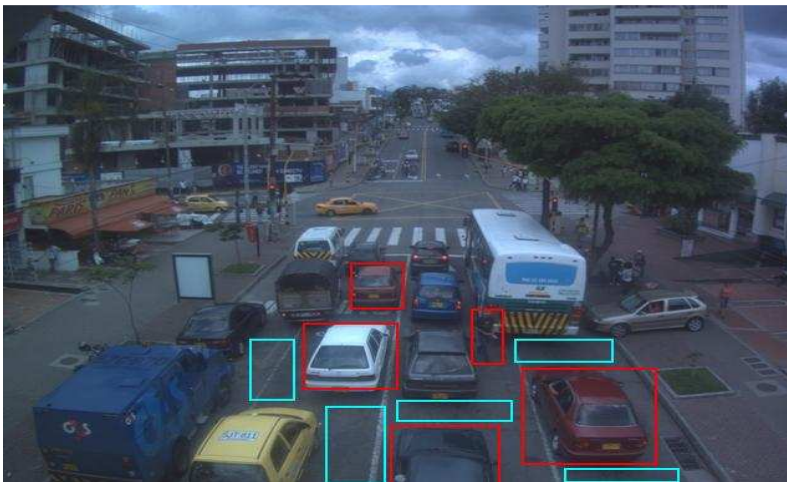
Estimación de Fondo: Es el cálculo del fondo de una escena —uno de los procesos esenciales en el presente trabajo— de donde son excluidos los objetos que se encuentran en primer plano. Este algoritmo nos ayudara a separar por ejemplo, los objetos que no pertenecen a la vía, tales como vehículos, motos, peatones, entre otros. Primero se estudia en detalle cómo está compuesta la escena, en donde se observa una serie de vehículos y personas, que serían los elementos a separar, adicionalmente, se aprecian algunas partes de la vía que componen el escenario. Pues bien, estos vehículos y personas son los elementos del primer plano o elementos *foreground*, mientras que la vía es el plano del fondo o *background* que queremos entrar a estimar, ya que como se ve observo en la imagen, hay partes de él que no conocemos.

Una vez conocemos la estructura de la escena, surgen interrogantes como, ¿cuando un elemento *foreground*, deja de serlo y se convierte en parte del fondo?, ¿cómo saber que partes de la vía que se está observando pertenecen al *background*?, entre otras.

³ Punto en el que se encuentran las líneas de la carretera.

Las respuestas a estas preguntas se convierten en el camino para resolver este problema, debido a que el computador no entiende el criterio de que es una vía y que no lo es. Por lo tanto, es necesario aprender el fondo de la imagen, esto puede ser resuelto usando métodos estadísticos como la media y la desviación estándar, aplicados en cada pixel de la imagen. Luego de haber aprendido el fondo, este es restado la escena actual, donde los elementos *foreground* son separados de la imagen para su posterior procesamiento y análisis.

Figura 37. Elementos superficiales al fondo (Color Rojo), Vía perteneciente al fondo (Color Cian)



Fuente: El autor

Aparentemente el problema de la estimación de fondo es sencillo en su planteamiento, pero si se mira con más detalle, surgen nuevos problemas, propios de una escena que guarda una mayor complejidad de la que se nota a simple vista. Entre los problemas de la escena se encuentran la vibración del medio de adquisición, la iluminación del escenario que varía en el tiempo, los objetos que no pertenecen al *background* pero que tampoco es necesario procesarlos, como por ejemplo personas, arboles en movimiento, entre otras. Estos factores exigen la necesidad de modelos estadísticos que aprendan estos cambios de forma eficaz, con el fin de no generar una estimación errónea del fondo que termine por generar resultados no deseados. Por esta razón, también es válido darle más prioridad a la eliminación de falsos positivos, ya sea mediante operaciones morfológicas o análisis de contornos, y alcanzar así el objetivo planteado.

Entre las técnicas más comunes de estimación, se encuentran:

Diferencia de frames:

- Muy eficiente.
- Sensible al umbral.

Figura 38. Diferencia de frames y umbralizado



Fuente: El autor

Media Móvil:

- Rápido.
- Solo aplicable en una escena donde los elementos *foreground* no permanezcan estáticos.

Figura 39. Media móvil

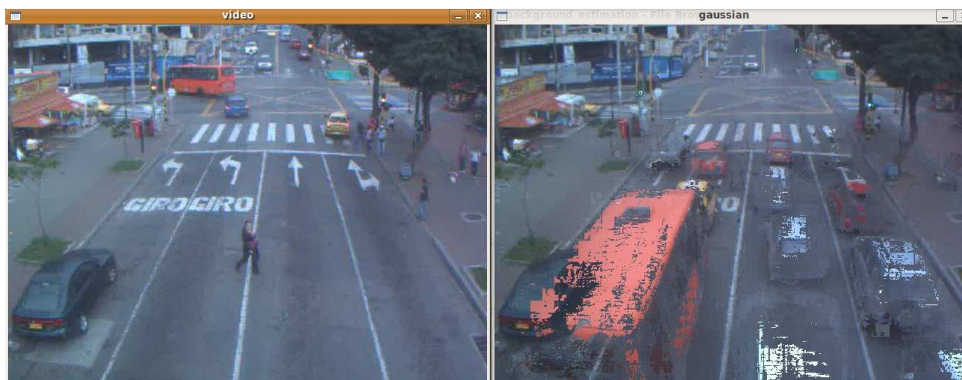


Fuente: El autor

Mezcla Gaussiana:

- Robusto
- Alto Consumo de Recursos.
- Sufre del mismo problema de la media móvil dada su naturaleza estadística.

Figura 40. Mezcla Gaussiana



Fuente: El autor

Media Segmentada (Ver Sección 7.6):

- Robusto.
- Evita los problemas de aprendizaje.
- Bajo Consumo de recursos.

3.5 ESTADO DEL ARTE

Con el pasar de los años, la expansión de la visión por computador a distintas áreas de la ciencia, demuestra, que la interpretación automática de imágenes adquiere cada vez, mayor importancia en la industria.

Por lo tanto, esta sección pretende resumir todo el entorno alrededor de la visión por computador, desde sus organizaciones, hasta los principales avances en visión por computador aplicados a la industria, principalmente en el monitoreo de tráfico vehicular.

3.5.1 Organizaciones

3.5.1.1 UKIVA

UKIVA es la Asociación industrial de visión en Gran Bretaña, su principal objetivo es promover el uso de la tecnología en visión e imagen en la industria y ciencia en distintos campos de la industria en Gran Bretaña.

Ukiva provee información de nuevos productos sobre visión por computador, además de justificar y promover el uso de esta, a través de publicaciones y eventos.

Figura 41. Logo UKIVA



Fuente: UKIVA

3.5.1.2 CVonline

Es un esfuerzo por parte de la escuela de informática de la Universidad de Edimburgo, de crear el mayor compendio de información acerca de visión por computador. En este Sitio podemos encontrar una inmensa colección de artículos e información sobre los más de 1500 temas que engloban la teoría de visión por computador [31]. Su objetivo principal está más que justificado, ya que logra organizar de manera pertinente todo el conocimiento generado en este campo desde 1980. Todo este proceso ha sido gracias a sus más 3000 colaboradores alrededor del mundo con los que cuenta esta iniciativa.

Figura 42. Logo *CVonline*



Fuente: *CVonline*

3.5.2 Empresas

En esta sección resumiremos las empresas dedicadas al monitoreo de tráfico usando la tecnología de análisis de imágenes y visión por computador.

3.5.2.1 Image Sensing

Fundada en 1984, es una empresa tecnológica dedicada al desarrollo de soluciones de software para la administración de tráfico, cuenta con presencia internacional en más de 60 países, y entre su gama de productos podemos encontrar soluciones basadas tanto en visión por computador como en radares [32].

Figura 43. Logo ISS



Fuente: Image Sensing Systems Inc

3.5.2.2 Traficon

Fundada en 1992, es una empresa belga que nace a partir del laboratorio ESAT de la Universidad de Lovaina (Bélgica), que desde 1979 empezó su investigación sobre el uso de sensores CCD en la detección de tráfico [33]. Actualmente, cuenta con presencia internacional en Asia, Europa y América. Un ejemplo de su tecnología se puede observar en la ciudad de Pereira – Colombia, que cuenta con una implementación sobre los carriles de prioridad para el Sistema de Transporte Masivo Megabus.

3.5.3 Academia

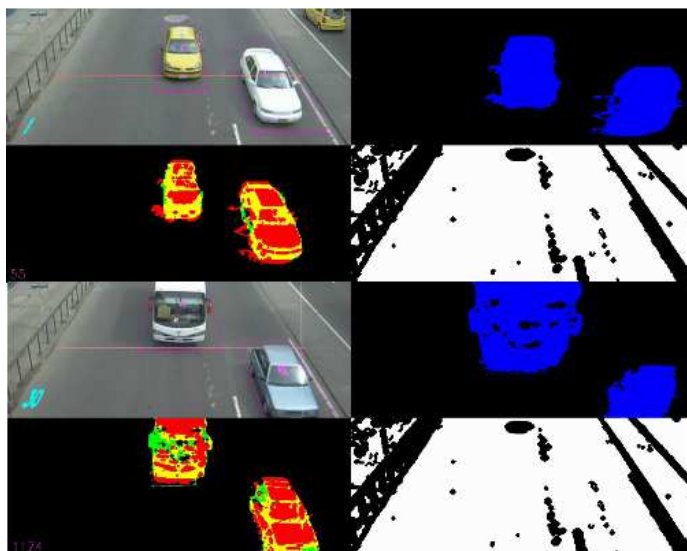
En el marco académico, como trabajos previos podemos citar los desarrollos llevados a cabo en Colombia, por la Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá, específicamente el grupo de investigación SIRP (Sistemas Inteligentes, Robótica y Percepción). Aquí podemos citar la tesis sobre Conteo Automático de Vehículos [34], mención de honor PUJ en el año 2009. Cuyo algoritmo cumple el mismo objetivo del presente desarrollo pero en un escenario offline, y un procesamiento que no es hecho en tiempo real.

Figura 44. Cámara TrafiCam Semáforo carrera 6 calle 19 – Pereira



Fuente: El autor

Figura 45. Conteo automático de vehículos



Fuente: Universidad Javeriana

3.6 OPENCV

3.6.1 ¿Qué es OpenCV?

OpenCV es una librería opensource multiplataforma (Windows, Linux, Mac OS X), de visión por computador, escrita totalmente en lenguaje c y c++.

Figura 46. Logo OpenCV



Fuente: OpenCV

Su creación en los laboratorios de Intel tenía como objetivo principal la alta eficiencia en aplicaciones de visión por computador, de manera tal que se pudieran realizar tareas complejas en tiempo real. Esta es la razón principal por la que fue escrita en lenguaje c [28], además OpenCV hace uso de optimizaciones como:

- Intel IPP⁴ (primitivas de rendimiento integrado).
- ICC - compilador de c y c++ de Intel.
- OpenMP⁵.

El uso de todas estas optimizaciones hace que se aprovechen mejor los recursos, tanto físicos y lógicos, en tareas de procesamiento de imágenes que, como es bien sabido, requieren un alto costo computacional. Por otra parte, OpenCV provee una interfaz de programación de fácil uso, que permite construir de manera sencilla y rápida, sofisticadas aplicaciones en visión por computador.

⁴ Intel IPP: Son una serie de rutinas matemáticas y de manejo de matrices de bajo nivel diseñadas por Intel para diferentes algoritmos.

⁵ OpenMP es una interfaz de programación que permite implementar un modelo de programación en paralelo sobre memoria compartida.

OpenCV ha tenido una gran acogida y es posible encontrar aplicaciones que usan esta librería en áreas como inspección de productos, imágenes medicas, seguridad, visión estereoscópica, robótica, etc. Por esta razón, actualmente OpenCV incluye más de 500 algoritmos en visión por computador que se pueden acceder a manera de funciones, además de algunos generales en Machine Learning (MLL), usados para el reconocimiento de patrones y tareas de clasificación dada su estrecha relación con la visión por computador.

3.6.2 ¿Por qué OpenCV?

Para el proceso de selección de la herramienta se valoraron las siguientes opciones:

- MATLAB (Image processing Toolbox)
- OpenCV
- VXL

Cada herramienta se evaluó con una serie de criterios, elegidos según el objetivo del proyecto (diseñar algoritmos de visión por computador para ser ejecutados en tiempo real sobre un S.O Linux), a los cuales se le han asignado un peso desde 0 hasta 5. Los criterios utilizados son listados en la tabla 2 y la ponderación se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Criterios de selección herramienta de procesamiento de imágenes

Criterio	Dominio	Peso (%)	Notas Adicionales
Licencia	0-1	20	Libre o Privativo
Documentación	0-5	25	Libros y Comunidad
Facilidad de uso	0-5	10	Lenguaje
Compatibilidad	1-5	15	Multiplataforma
Rendimiento	1-5	30	Tiempo Real

Fuente: El autor

Tabla 3. Ponderación de criterios

Her.\Crit.	Licencia	Documentación	Facilidad de uso	Compatibilidad	Rendimiento	Suma
Matlab	0	5	5	5	3	3,4
OpenCV	1	4	4	5	5	3,85
VXL	1	2	3	3	2	2,05

Fuente: El autor

Con los criterios elegidos y las ponderaciones realizadas, OpenCV es la que mejor resultado obtiene, teniendo en cuenta el perfil de la implementación que se llevara a cabo.

3.6.3 Historia

En los años 90, Gary Bradski⁶ uno de los creadores de OpenCV y actualmente profesor de ciencias de la computación en la Universidad de Stanford, trabajaba para Intel en el desarrollo de aplicaciones avanzadas en el uso intensivo de la CPU. Empezó al mismo tiempo a visitar distintas universidades como el MIT, y notó que ellas habían diseñado una infraestructura propia de visión por computador abierta, bien diseñada y que eran pasadas de estudiante a estudiante para el desarrollo de sus propias aplicaciones.

Esto llevó a crear OpenCV como una iniciativa para establecer una infraestructura de visión por computador universal y disponible a toda la comunidad. Con la ayuda del equipo de desarrollo de librerías de alto rendimiento de Intel en Rusia, empezó el camino para la reinención e implementación de las funciones básicas en visión por computador mientras, a su vez, eran optimizadas gracias al trabajo conjunto con Intel.

Así, en enero de 1999, Gary junto a su compañero de trabajo Adrian Kaehler⁷, iniciaron actividades para la creación de OpenCV. Desde ese momento es usada en muchos campos como el militar, biológico, robótico, etc. Seis años después OpenCV era la llave para ganar el **Darpa Grand Challenge 2005**⁸ con el robot “Stanley” de la Universidad de Stanford.

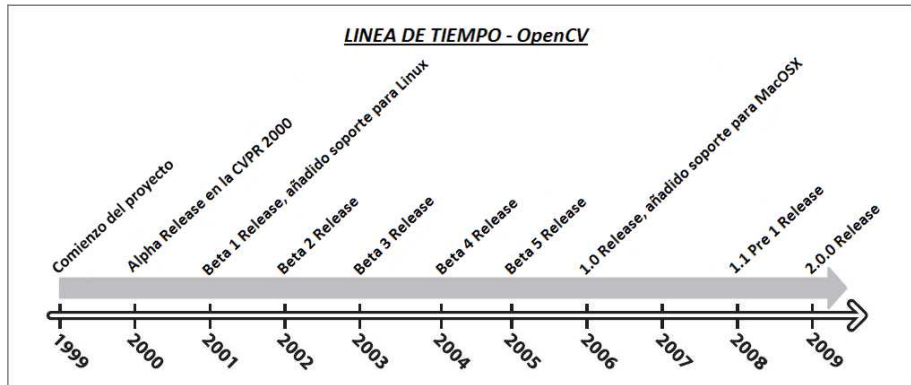
Dada su naturaleza de código abierto, OpenCV ha generado una comunidad de usuarios que se expande de forma constante, creándose grupos de discusión alrededor del mundo en internet, como el grupo de Yahoo que cuenta con aproximadamente cuarenta mil (40.000) miembros, incentivando así, la constante optimización de las funciones ya existentes y la implementación de otras nuevas, lo que a su vez hace viable su soporte a largo plazo. En la figura 47 se muestran los eventos más relevantes de OpenCV desde su creación en 1999.

⁶ Biografía - Gary Bradsky <http://www.oreillynet.com/pub/au/3270>

⁷ Biografía – Adrian Kaehler <http://www.oreillynet.com/pub/au/3271>

⁸ Carrera de vehículos autónomos que deben llegar desde un punto de los Estados Unidos hasta otro sin intervención humana. Sólo disponiendo de un listado de puntos intermedios entre el principio del circuito y el final. Sitio Oficial Darpa Challenge - <http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>

Figura 47. Cronología OpenCV



Fuente: OpenCV Documentation

3.6.4 Usando OpenCV

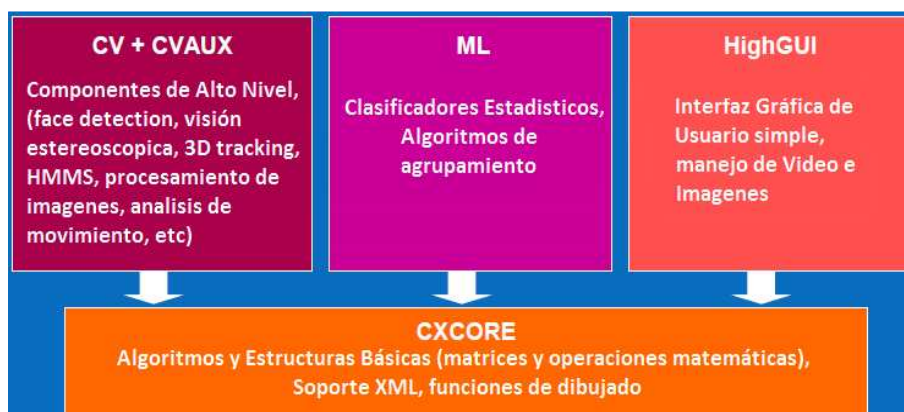
En esta sección se explicará la estructura de OpenCV, sus tipos de datos y como se comportan cada uno de ellos, posteriormente se explica el proceso de instalación.

3.6.4.1 Arquitectura

OpenCV se compone de 5 componentes principales en las que se encuentran:

- **CV (Computer Vision)** – Procesamiento de imágenes y algoritmos de visión por computador.
- **ML (Machine Learning)** – Contiene herramientas de agrupación, clasificación y funciones de análisis de datos.
- **HighGUI** – Contiene la interfaz grafica de usuario, y la funciones de guardado y llamado tanto para video como imágenes.
- **CXCore** – Contiene las estructuras de datos, el manejo de memoria, el manejo de errores, además del algebra básica y matricial, junto con el dibujado, etc.
- **CVAUX** – Contiene los algoritmos experimentales, detección de rostros, visión estereoscópicas, entre otros.

Figura 48. Componentes de OpenCV



Fuente: OpenCV Domcumentation

3.6.4.2 Tipos de datos

Dado su extenso número de funciones, OpenCV contiene muchas estructuras que hacen más fácil su uso en los distintos algoritmos de la librería. Desde el punto de vista de lenguaje c, estos tipos abstractos de datos están a su vez compuestos por datos más simples, pasando por enteros, flotantes y dobles como tipos más comunes.

La tabla 4 muestra las estructuras para el manejo de puntos, tamaños, rectángulos y tuplas escalares:

Tabla 4. Estructuras de OpenCV

Estructura	Contiene	Representa
CvPoint	Int x, y	Coordenada (x,y) en una imagen
CvPoint2D32f	Float x, y	Punto en R2
CvPoint3D32f	Float x, y, z	Punto en R3
CvSize	Int ancho, alto	Tamaño de la imagen o un ROI

Fuente: El autor

3.6.4.3 Instalando OpenCV

Esta guía de instalación ha sido construida a partir de diversas fuentes en Internet con el fin de adecuarse al sistema operativo, el software adicional y la plataforma de pruebas:

Software:

- Ubuntu 9.04 Jaunty Janckalope
- OpenCV 1.2.0

Empezaremos por abrir un Terminal (o consola) y digitar:

```
$ sudo apt-get install libavformat-dev libjpeg-dev libpng-dev  
libswscale-dev libjasper-dev libtiff4-dev
```

Esto instalara las librerías FFMPEG, que servirán para manipular los distintos formatos de video e imagen.

Luego se continúa con la instalación de la librería GTK+ que será usada por HighGUI para la interfaz gráfica de usuario.

```
$ sudo apt-get install libgtk2.0-dev
```

A continuación se instala cmake (herramienta de auto instalación que agilizará dicha tarea con OpenCV).

```
$ sudo apt-get install cmake  
$ cd $HOME
```

Una vez listo el cmake descargar la última versión de OpenCV, que se puede obtener tanto del sitio oficial en sourceforge como desde su servidor SVN también alojado en sourceforge.

a) Sitio Oficial

```
$ wget  
http://downloads.sourceforge.net/project/opencvlibrary/opencv-unix/2.0beta/OpenCV-1.2.0.tar.bz2
```

b) SVN

```
$ cd $HOME  
$ svn co  
http://opencvlibrary.svn.sourceforge.net/svnroot/opencvlibrary/trunk/opencv
```

```
$ svn co
http://opencvlibrary.svn.sourceforge.net/svnroot/opencvlibrary/trunk/opencv_extra
```

En este punto empieza el proceso de configuración y generación del Makefile:

```
$ tar -jxvf OpenCV-1.2.0.tar.bz2
$ cd OpenCV-1.2.0
$ mkdir cmakefiles
$ cd cmakefiles
$ cmake ../../OpenCV-1.2.0
```

Se verifica la existencia de las librerías tiff y jasper y se genera el Makefile con el Wizard de cmake.

Ahora es posible construir los ejecutables e instalar, digitando:

```
$ make
$ sudo make install
```

Si no ha salido ningún error se termina por configurar el `$PATH` para que la librería sea reconocida por el sistema; es posible realizar esta tarea de dos formas:

- a) Con permisos de superusuario se crea un archivo en la carpeta `/etc/ld.so.conf.d/` llamado "opencv.conf" y en él se agrega la siguiente ruta:

```
/usr/local/lib
```

Luego se debe actualizar las librerías usadas por el sistema con el siguiente comando:

```
$ sudo ldconfig -v
```

Es recomendable realizar este paso cada que se modifique el `$PATH` o instalen nuevos programas.

La segunda opción es agregar directamente la ruta al `LD_LIBRARY_PATH` con el comando:

```
$ export LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/lib:$LD_LIBRARY_PATH
```

3.7 HARDWARE

A continuación describiremos todo el hardware que rodea la implementación, sus características y su rol en el presente desarrollo.

La solución está compuesta por dos elementos claramente separables. El primero es el sistema de procesamiento encargado de ejecutar los algoritmos de visión por computador. El segundo es el medio de adquisición “cámara” que cumple la función de capturar el video en tiempo real que alimenta al sistema de procesamiento.

Tabla 5. Plataforma de implementación



Fuente: El autor

3.7.1 Sistema de procesamiento

El primer componente de la plataforma, es un sistema embebido compuesto por una placa base convencional de factor de forma reducido Mini-ITX⁹, un procesador x86, memoria RAM y un disco duro para el almacenamiento, todo gobernado por un sistema operativo Linux, en la tabla 6 se presentan algunos otros detalles.

⁹ Mini-ITX

Tabla 6. Hardware y software

Hardware	
Placa Base	Zotac nForce 630i-ITX
CPU	Intel Core2Duo e8400 3.00Ghz, Cache 6MB, Socket LGA775
Red	Ethernet Integrado 10/100 Base T
Memoria	MarkVision PC6400U 1X2048MB, DDR2@800Mhz
Tarjeta Grafica	Integrada – Nvidia GeForce 7100
Disco Duro	Western Digital Scorpio Black SATA 3.0 Gb/s, 320 GB@7200rpm
Fuente de Alimentación	Sparkle – FSP200-50PL 200 Watts, ATX 12V
Software	
Sistema Operativo	Ubuntu Linux 9.04 Kernel 2.6.28-11-generic
Librería – Visión por Computador	OpenCV 1.2Beta
Lenguaje de Programación	C, C++
Compilador	GCC 4.3.3 Intel C++ Compiler 11.1
Librerías de Optimización	IPP 6.1 OpenMP
Video LoopBack	AVLD 0.1.4
Codificador de Streaming	Mencoder Revisión 29717

Fuente: El autor

Figura 49. (a) Placa Base (b) CPU y Disipador (c) Memorias RAM (d) Disco Duro



Fuente: El autor

3.7.2 Cámara de video

La cámara usada en el desarrollo del proyecto es una cámara por red Elphel 353, fabricada por Elphel Inc. Dicha cámara se compone de un sensor de adquisición y un sistema embebido (FPGA+SoC), que es gobernado por un sistema operativo Linux.

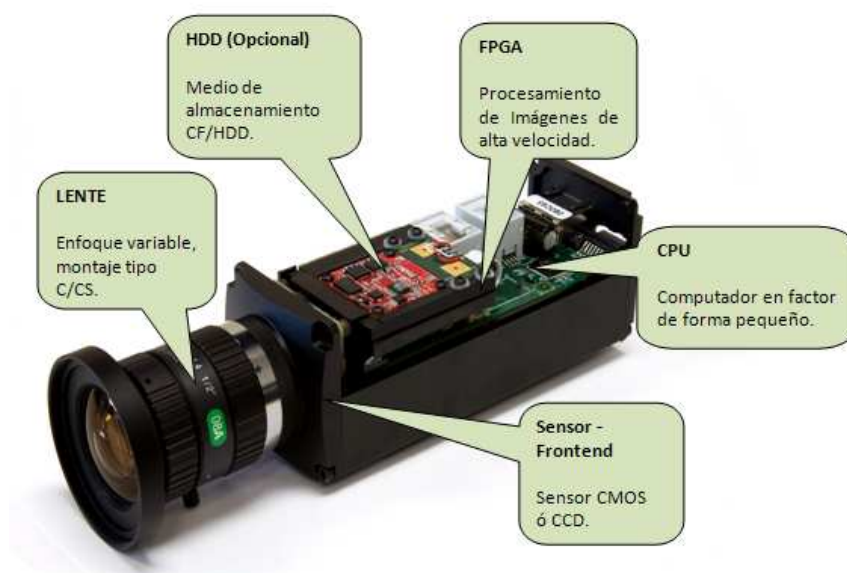
Entre sus ventajas, encontramos:

- Soporte de sensores de alta resolución (Kodak 16Mpix CCD, Aptina 5Mpix CMOS).
- Compresión de video de alta velocidad @80Mpix/s.
- Live Streaming a través del protocolo rtsp.
- Multitud de formatos de grabación de video (Quicktime, OGM, JPEG Image Sequence, JP4 RAW Image Sequence, Ogg Theora, HDR).
- Multitud de interfaces de datos (Compact Flash Card, SATA tanto HDD como Raid, Ethernet 100Mbit, USB, RS-232).
- Soporte de interfaces de programación de aplicaciones amigables (PHP, CGI, C, C++).

Código de campo cambiado

- Producto Open Source y Open Hardware. Todas las fuentes del software y el hardware (FPGA), han sido liberadas bajo licencia GNU GPL v3.0.
- Alimentación por red (PoE 802.3af).
- Bajo consumo eléctrico (2.4W ~ 5.8W).
- Soporte para múltiples sensores en tiempo real.
- Soporte de GPS para geolocalización.
- Soporte de integración con tecnología RFID.
- Sistema operativo abierto (distribución Linux)
- Sesión remota (Telnet, SSH).

Figura 50. Cámara Elphel 353



Fuente: Elphel Inc.

Figura 51. Hardware de camara Elphel

Hardware Camara Elphel	
CPU	Axis Etrax FS 32bits@200Mhz
Almacenamiento	Memoria Flash 128MB (S.O) SSD/CF (Opcional)
Red	Ethernet Integrado 10/100 Base T, 802.3af PoE
Memoria	Sistema - SDRAM64MB Buffer Grafico – DDR 64MB
FPGA	Xilinx (R) Spartan3E 1200K gates, FT256
LENTE	Computar H2Z0414C-MP 1/2", 4.5-13.2mm, F1.8, Enfoque Variable, Montaje CS

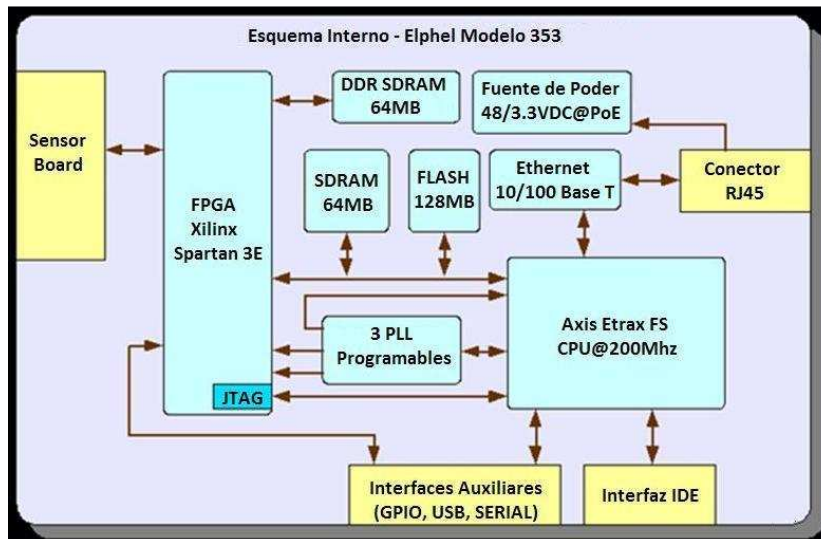
Fuente: Elphel Inc.

3.7.2.1 Arquitectura interna

El diagrama de figura 52 muestra de forma específica el diseño interno de la cámara, incluyendo la distribución de los distintos componentes dentro de la placa base, como son:

- Las I/O's e interfaces externas.
- Las memorias RAM y flash.
- El módulo de alimentación sobre PoE.
- La FPGA y la CPU.

Figura 52. Esquema de la placa base 10353 usada por la cámara de pruebas



Fuente: Elphel Inc.

3.7.2.2 Software Elphel

Como se dijo anteriormente, la cámara está gobernada por un sistema operativo Linux especialmente configurado para las capacidades del dispositivo y orientado a la web. Adicionalmente, este sistema cuenta con aplicaciones y servicios básicos de un sistema operativo Unix común como el manejo de archivos, las sesiones remotas, el soporte de scripts, entre otros. A continuación se nombran los que más interesan en el desarrollo de este proyecto.

3.7.2.3 Imgsrv

Es un servidor http especializado que adquiere imágenes directamente del buffer de memoria circular de la cámara. Este servidor no tiene ningún control sobre el sensor o la FPGA, su única función es obtener una imagen del buffer y entregarla al proceso que lo solicite, en este caso una petición HTTP.

3.7.2.4 Soporte PHP 5.2.1

Gracias a su forma de control via web, el sistema operativo soporta lenguaje PHP, permitiendo un desarrollo amigable y de buen rendimiento (Fast CGI), además acepta funcionalidades desarrolladas en lenguaje C, proporcionando un balance entre facilidad de desarrollo (PHP) y rendimiento (C).

3.7.2.5 App bar

Es el panel de navegación de las funcionalidades de la cámara, que puede ser accedido a través de cualquier navegador web.

Su objetivo es proveer de forma intuitiva, una asistencia en la configuración y uso del sistema a los usuarios que recientemente han empezado a trabajar con la cámara. Entre sus funcionalidades esta:

- Información general de la cámara como la hora, el firmware, el serial, etc.
- Control y streaming de la cámara y parámetros generales.
- Editor de parámetros tanto del sensor como de la FPGA y sus funcionalidades de compresión.
- Grabador de video.
- Web Bash, versión web de la consola del sistema operativo Linux que opera la cámara.

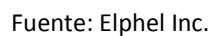
3.7.2.6 Camogm

Programa de grabación de videos a bajo nivel (desde línea de comandos). Camogm permite grabar videostreaming a cualquier dispositivo de almacenamiento conectado al sistema, desde tarjetas flash hasta servidores NFS como ha sido usado en el presente desarrollo. Además permite:

- Un bajo uso del procesador ETRAX FS y los recursos de la cámara.
- Ser ejecutado en segundo plano aceptando comandos que cambian su comportamiento en tiempo real.
- Grabación en multitud de medios de almacenamiento.
- Ser controlado a través de la Interfaz web y la línea de comandos.

3.7.2.7 Linux LiveCD

Sistema operativo ejecutable en cualquier PC, dotado de una interfaz muy intuitiva que facilita las tareas de actualización del sistema operativo y programación de la FPGA por a través de Ethernet.



Paquete de librerías para desarrollar aplicaciones que puedan ser ejecutadas en el sistema embebido.

3.8 IMPLEMENTACIÓN

Detengámonos un instante y razonemos sobre lo que representa la imagen. Casi inmediatamente, el cerebro humano es capaz de asociar que es alguien que sostiene un espejo esférico, sobre el cual se reflejan él mismo y la habitación en la que se encuentra. Pero, ¿qué tan fácil es hacer esa misma interpretación cuando no se tiene el poder de ver la imagen como un todo y, peor aún, no se tienen todos los conocimientos de la realidad adquiridos durante toda una vida de observación del mundo, ni tampoco las asociaciones que se crean entre esos conocimientos? Esto deja ver cuán difícil es hacer una interpretación adecuada de la realidad a partir de una imagen usando un computador que no tiene las capacidades de análisis del cerebro humano (al menos no hasta la fecha de publicación de este documento). Obviamente, entenderá aun más esta dificultad si interpretó la imagen de otra manera.

Figura 54. “Mano con Globo Reflectante” M.C. Escher. La dificultad de interpretación en visión por computador



Fuente: El Rincón de la Ciencia. Ciencia y Arte nº 31, junio de 2005

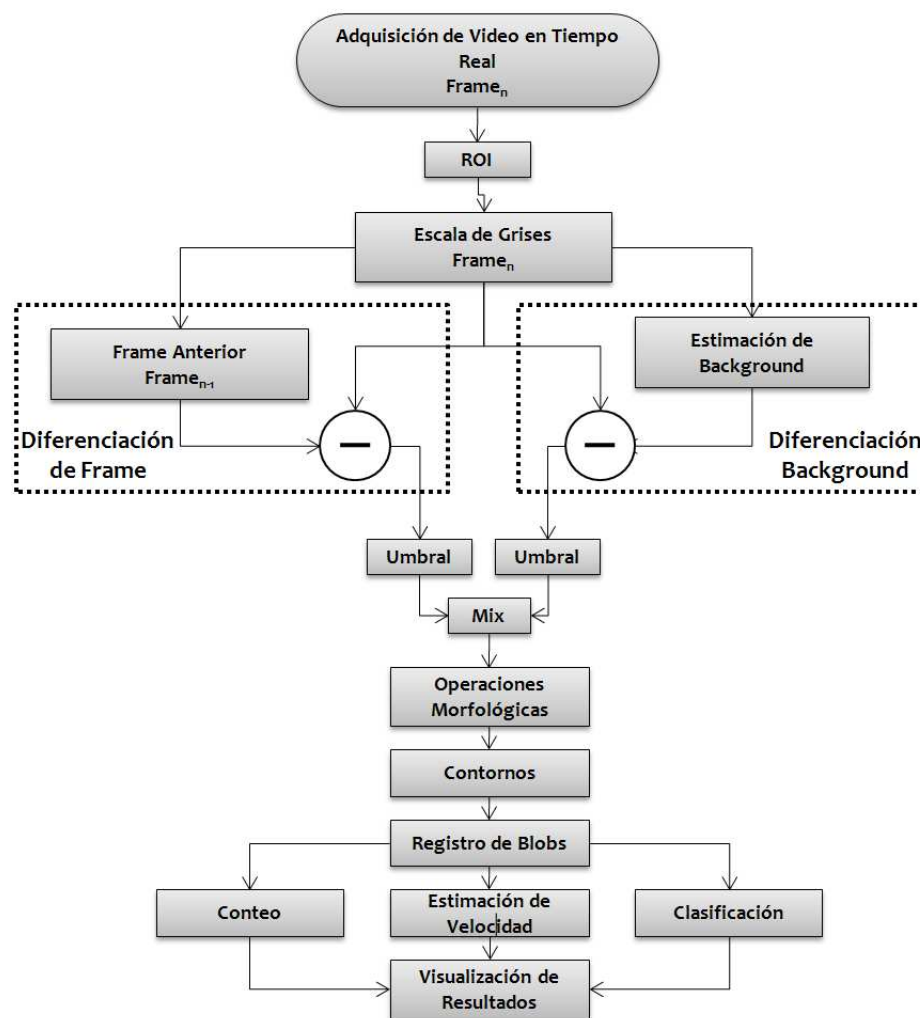
En este punto, el lector conoce muchos de los conceptos básicos de visión por computador y es consciente de las dificultades que se pueden encontrar para extraer información a partir de una imagen o una secuencia de ellas. En este capítulo, se trata de ilustrar paso a paso la solución que se plantea para el observatorio de movilidad vial, con el fin de realizar el conteo, la estimación de velocidad y clasificación de vehículos.

3.8.1 Descripción general

En la se muestra el diagrama general de bloques del algoritmo implementado. En las secciones siguientes se dará una explicación más detallada de cada uno de los bloques que componen el diagrama.

Como se puede ver, en cada uno de los bloques se mencionan operaciones que en su mayoría ya se han tratado en este documento. Para obtener un buen entendimiento de cada paso es absolutamente recomendado leer los capítulos anteriores, ya que en ellos se encuentran las herramientas de trabajo tanto en hardware y software, los modos de comunicación y operaciones básicas en general necesarias para el desarrollo del algoritmo que será explicado.

Figura 55. Diagrama de bloques del algoritmo



Fuente: El autor

3.8.2 Adquisición de video

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la adquisición de video se realiza con cámaras Elphel 353. Cada una de las cámaras se conecta a través de un *switch* con el sistema de procesamiento y se accede al *streaming* de video en tiempo real.

Previamente se debe calibrar la cámara, esto es, establecer el número de cuadros por segundo (*fps*), los valores de apertura, foco, tiempo de exposición, etc. Se debe tener en cuenta que estos parámetros pueden variar según el modelo de cámara que se use. La figura 56 es la captura de un *frame* en la intersección de invico. Este es uno de los casos de prueba que se presenta más adelante y, a partir de aquí, se usará como ejemplo para mostrar las transformaciones que sufre un *frame* mientras pasa por cada una de las etapas del algoritmo.

Figura 56. Adquisición de la imagen



Fuente: El autor

3.8.3 Región de interés ROI

Luego de la adquisición de la imagen es necesario establecer la región en la que realmente esta la información requerida (ROI). Esta región de interés será la que realmente se

procese, la información que no pertenece a la vía o que simplemente no interesa será obviada por el algoritmo. Como se ve en la figura 57, la región de interés en este caso se estableció incluso “borrando” parte misma de la calle. La razón para esta determinación será explicada en detalle más adelante, por ahora es suficiente conocer la zona del *frame* que se desea procesar.

Figura 57. Región de interés (ROI)



Fuente: El autor

Aunque la definición de la región de interés es un proceso simple, note la gran cantidad de información que estaba contenida dentro del *frame* y que ahora se obviará. Esto permitirá una mayor velocidad de procesamiento y más importante aún, evitará que el algoritmo se “desconcentre” con los fenómenos que puedan suceder en la acera, el movimiento natural de las hojas de los árboles, la gente que pasa por la cebra o los autos que atraviesan y giran desde los otros carriles. Todo esto denota la gran importancia de una adecuada definición de la región de interés y muestra la influencia que puede tener en la eficiencia de un algoritmo de visión por computador.

3.8.4 Escala de grises

En este punto se tiene una imagen con representación en RGB. Esto quiere decir que se tiene información en tres canales, uno para cada color (Red, Green, Blue). Es hora entonces de transformar la información a escala de grises, de esta manera se obtiene una imagen en un solo canal y se adecua para las siguientes etapas del algoritmo.

Figura 58. Escala de grises



Fuente: El autor

Ahora, como se ve en el diagrama de bloques de la figura 55, se inician en paralelo dos procesos de diferenciación. Ambos toman como entrada la imagen en escala de grises y se usan para segmentación de la escena. Ahora bien, la razón para usar dos métodos que en teoría realizan lo mismo, es que sus resultados se complementan muy bien en el escenario objeto de estudio. Para entenderlo, primero se debe comprender las similitudes y diferencias entre los dos procesos.

3.8.5 Diferenciación de *frame*

Como se vio anteriormente, una de las maneras más fáciles de segmentar las imágenes es haciendo una diferenciación directamente entre el *frame* actual y el *frame*

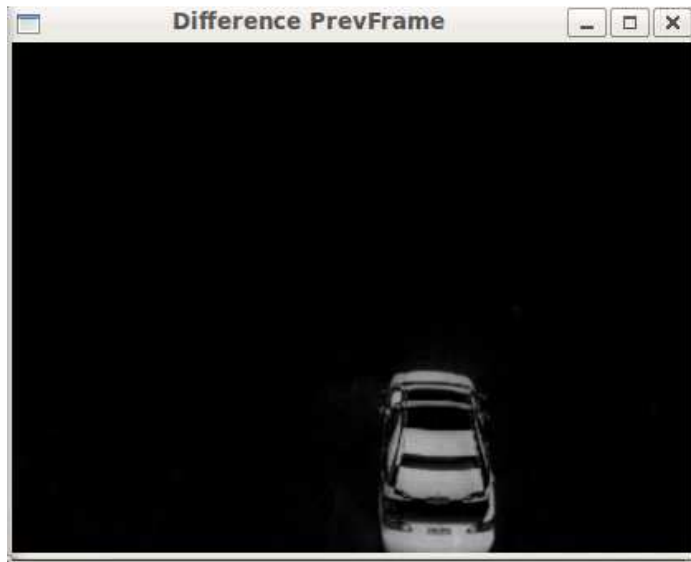
inmediatamente anterior. En la figura 59 se hace un paralelo entre el *frame* que se ha tomado de ejemplo (derecha) y el correspondiente *frame* anterior (izquierda). Nótese que en el *frame* actual (derecha), el automóvil esta mas retirado del borde inferior de la ventana, lo que indica un movimiento con respecto al *frame* anterior. Es precisamente ese cambio de posición lo que se intenta detectar con la diferenciación de *frame*. El resultado que se obtiene se ilustra en la figura 60. Se observa pues que todos los pixeles que permanecieron estáticos desaparecen de la escena y se conservan solo los que cambiaron su valor o, dicho de otra forma, los que se vieron afectados por el movimiento del vehículo.

Figura 59. *Frames* para diferenciación



Fuente: El autor

Figura 60. Resultado de la diferenciación entre *frames*



Fuente: El autor

Como se menciono antes, este es el primer y más simple acercamiento a detección de movimiento en una escena y pretende segmentar de la imagen los objetos de interés (los que están en movimiento).

3.8.6 Estimación de *background* – Algoritmo Media Segmentada

En la diferenciación de *background* se tiene básicamente el mismo proceso que en la diferenciación de *frame*. Lo interesante en esta etapa es el algoritmo de estimación de *background* que se utilice.

Se probaron varios algoritmos de estimación de *background* en busca de una solución global, que no solo fuera adecuada para el caso de tráfico vehicular, sino que pudiera calcular el *background* en cualquier escenario. No obstante, debido a los resultados y las múltiples dificultades que se presentaron, se optó por hacer una estimación de *background* mas específica y que cumpliera con los requerimientos del caso de estudio. Recordando la definición de visión por computador, se encuentra que la mayor parte de aplicaciones en el área se desarrollan de manera específica según el problema enfrentado.

Si se observa con detenimiento la figura 61 se puede pensar que en los carriles de la calle se presenta un gris más o menos uniforme, a excepción de la parte de la “cebra” y las indicaciones de sentido y giro (concretamente las flechas y la palabra “GIRO” en los carriles izquierdos). Pues bien, esta suposición es bastante cierta, mucho más, si se consideran regiones muy pequeñas dentro de la vía y se obvian las partes de señalización blanca. Con dichas condiciones se definió la región de interés (en verde) y la segmentación (en rojo) de cada uno de los carriles.

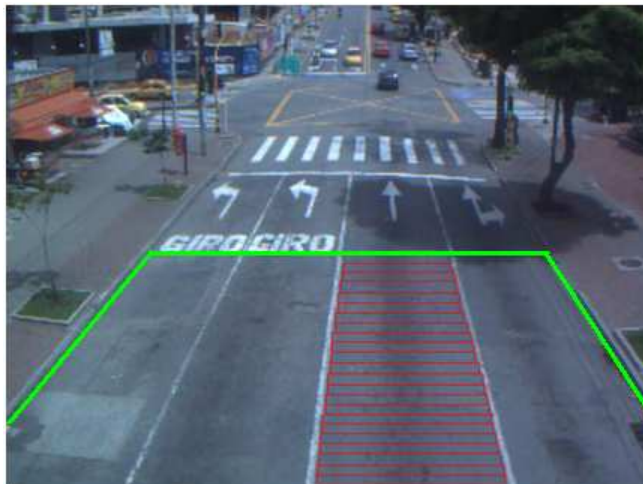
Figura 61. Análisis de color



Fuente: El autor

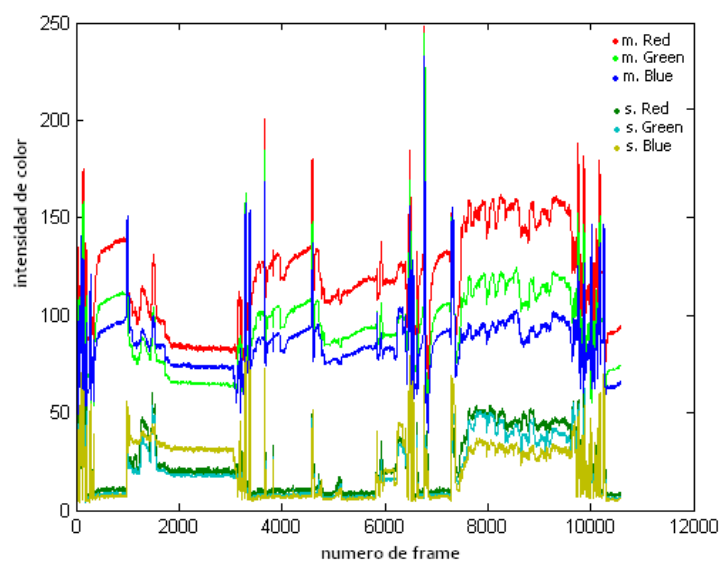
Luego de hacer esta división se analizó un video de prueba de más de diez mil (10.000) *frames* del caso invico. Se tomaron los valores de la media y la desviación estándar en cada *frame* para cada uno de los canales RGB. Los datos obtenidos se grafican en la figura 63.

Figura 62. Segmentación del escenario



Fuente: El autor

Figura 63. Análisis de color en una región en el caso Invico



Fuente: El autor

Analizando los datos obtenidos de una de las regiones (elegida arbitrariamente), se puede comprobar la propiedad de uniformidad del color gris, en donde la desviación estándar es muy baja y se mantiene casi constante. Esto se cumple durante los lapsos de tiempo en donde no hay objetos de primer plano moviéndose a través de la región, sin embargo, en cuanto un objeto cualquiera ingresa a ésta, se produce una pronunciada elevación de la desviación estándar.

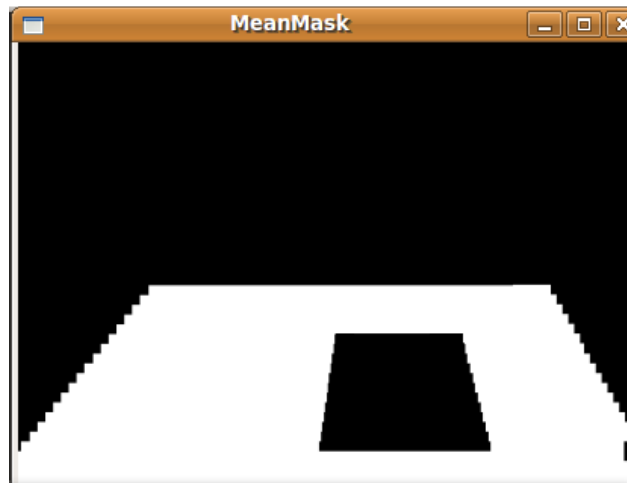
Según lo anterior, se puede concluir entonces que cuando la desviación estándar de una región toma valores inferiores a un umbral (cercano a cero), se *debe o es conveniente* realizar una actualización del fondo en este sector, debido a que se considera que toda la región hace parte de éste.

A medida que un objeto entra en el escenario, va causando un aumento de la desviación estándar en cada una de las regiones sobre las que se encuentra. Esto se puede apreciar claramente en la figura 63, donde los picos coinciden con la aparición de un carro en la escena y, se nota también, como la desviación estándar se incrementa debido a la alta dispersión de los datos.

Todo esto permite usar, en este caso, la desviación estándar como criterio para conocer que regiones del escenario están vacías. La máscara generada indica que datos deben ser tomados en cuenta para actualizar el *background*, representados por las zonas en blanco. Finalmente en la figura 65 se muestra el *background* obtenido.

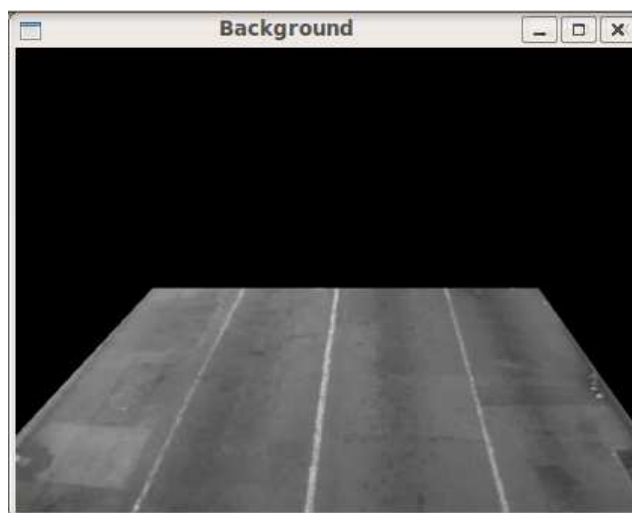
Nótese, por ejemplo, que según la máscara de la figura 64 debe actualizarse todo el *background* a excepción de la zona donde se encuentra el automóvil que se ha venido analizando a lo largo de este capítulo, pues este es un elemento *foreground* y no hace parte del *background*.

Figura 64. Mascara para actualización de *background*



Fuente: El autor

Figura 65. *Background*



Fuente: El autor

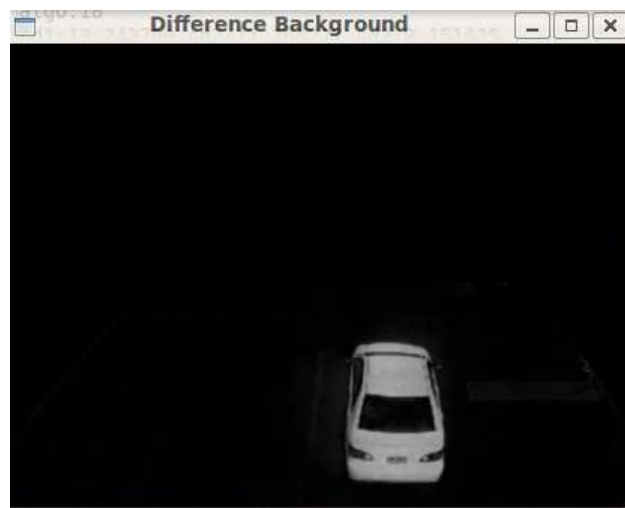
Una vez se ha calculado el *background* de la escena, se hace la diferenciación entre este y el *frame* actual. El resultado es mostrado en la figura 67.

Figura 66. Comparación entre el *frame* actual y el *background*



Fuente: El autor

Figura 67. Diferencia de *background*

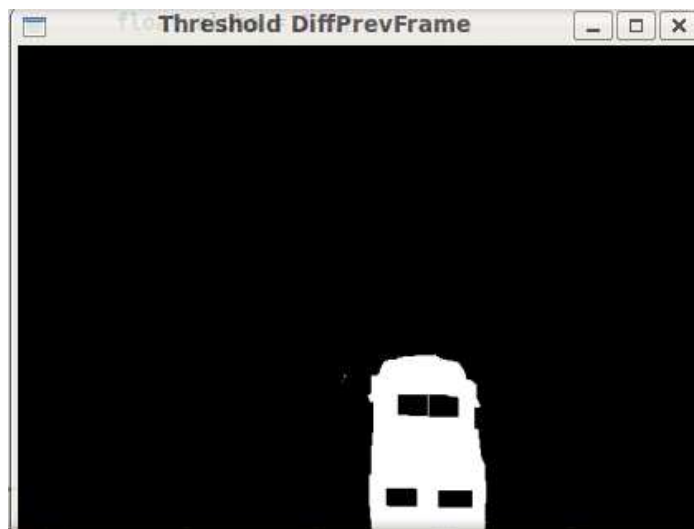


Fuente: El autor

3.8.7 Umbral (*Threshold*)

Hasta aquí se tienen los resultados de la diferenciación de *frame* y de *background*. El siguiente paso, como lo indica el diagrama de bloques de la figura 55, es aplicar a cada uno de ellos un umbral binario. Esto hace que los valores que están por encima del umbral queden en el valor máximo (blanco) y los que no, sean llevados al valor mínimo (negro), de esta manera se elimina el ruido causado por cambios no significativos de los píxeles. Las figuras 68 y 69 muestran los resultados de aplicar el umbral binario en la diferenciación de *frame* y *background* respectivamente.

Figura 68. Umbral sobre diferenciación de *frame*



Fuente: El autor

Figura 69. Umbral diferenciación de *background*



Fuente: El autor

3.8.8 Mix

En este punto del proceso tenemos dos segmentaciones generadas a partir de métodos diferentes. Se hace a continuación un pequeño análisis de cada uno para explicar las razones.

La diferenciación de *frame* es perfecta para detectar objetos en movimiento. Sin embargo, en cuanto no hay movimiento (como en el típico caso de un semáforo en rojo), todos los elementos que deberían pertenecer al *foreground*, desaparecen. Esto es apenas obvio ya que al no existir movimiento entre un *frame* y otro, el hacer diferencia entre ellos da como resultado cero (imagen en negro).

Por otra parte, la diferenciación de *background* funciona relativamente bien en ambos escenarios, tanto en movimiento como en momentos en los que los elementos *foreground* de repente se quedan estáticos. Esto se debe a que la diferencia se hace con el cálculo del *background* y no basados en el movimiento.

No obstante, algunas ocasiones, por ejemplo cuando el *background* está contaminado o sucio por efectos de iluminación y otros, la diferenciación de *frame* ayuda bastante en la

detección de los elementos *foreground*. Por esta razón se trabajan ambos tipos de diferenciación.

En la figura 70 se muestra el resultado final para la diferenciación de *frame* (a la izquierda) y diferenciación de *background* (a la derecha).

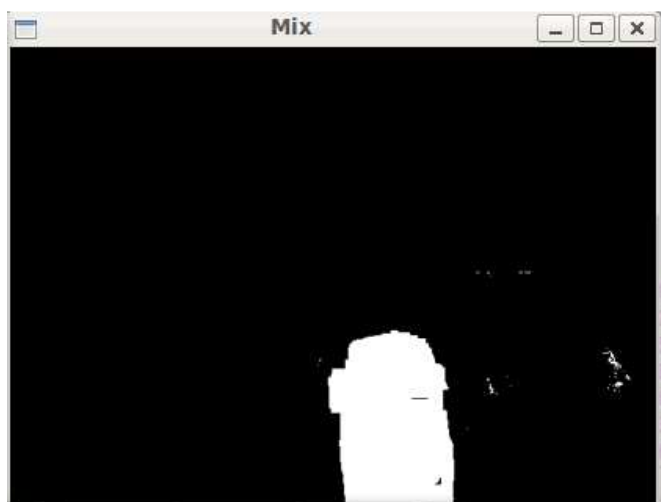
Figura 70. Comparación entre diferenciación y *background*



Fuente: El autor

Ahora solo queda unir ambos resultados en una sola imagen, de forma tal que se complementen y se obtenga así una mejor detección del vehículo

Figura 71. Resultado de operación Mix

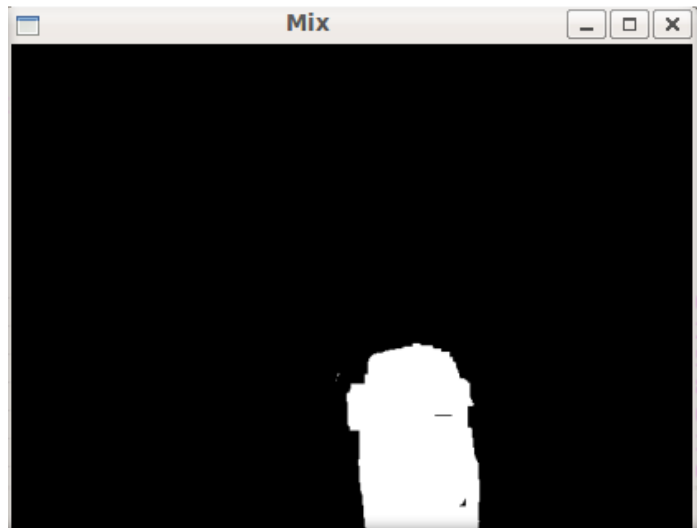


Fuente: El autor

3.8.9 Operaciones morfológicas

Para eliminar el ruido del *frame* que se obtuvo en la etapa anterior, se aplica una operación de apertura, de esta manera las pequeñas áreas son eliminadas. Luego se realiza una operación de cierre para lograr una mejor definición de los elementos del *foreground*. El resultado se muestra en la figura 72, como se puede notar, desaparecieron las zonas blancas de la derecha, eliminando así las zonas externas al automóvil y que no interesan.

Figura 72. Operaciones morfológicas



Fuente: El autor

3.8.10 Contornos

Hasta aquí, se han definido los elementos del *foreground* pero no se tiene una referencia en si a cada uno de ellos, de manera que se pueda caracterizarlo como un solo objeto y hacer seguimiento del mismo a través de las secuencias de *frames*. Ahora que se tienen los elementos del *foreground* se pueden hallar los contornos de la imagen. Esto permitirá estructurar los datos de cada objeto y realizar la extracción final de información. En la figura 73 se dibujan los contornos con un parámetro que permite su llenado.

Figura 73. Contornos



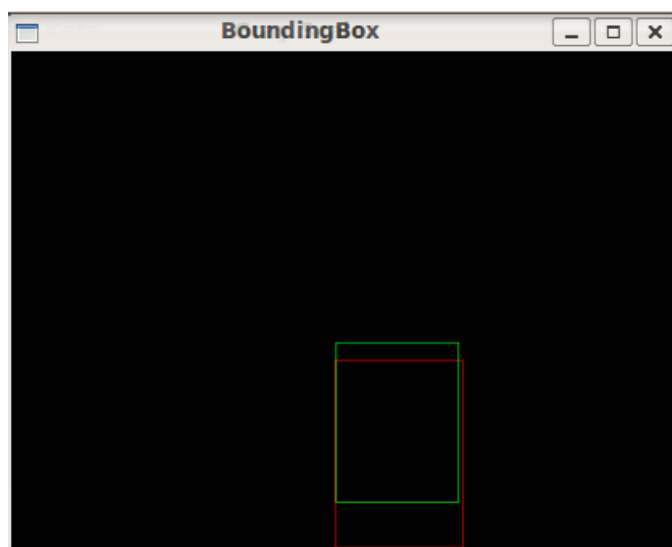
Fuente: El autor

3.8.11 Registro de contornos

En esta etapa del proceso, se procede a guardar la información obtenida de cada *frame*. Para ello, se registran en una lista los contornos o cajas de frontera (*bounding box* en ingles) que representan cada uno de los elementos *foreground* detectados. En estas estructuras se guardan la posición, el centroide, el área y otros datos de los elementos *foreground* que se requieran para hacer un análisis de alto nivel.

Todo esto se hace con el fin de que, al procesar el siguiente *frame*, se pueda hacer una traza de los elementos ya detectados e incluir los nuevos. De esta manera se puede mantener actualizada la lista y la información que se extrae a partir de ella, bien sea estimación de velocidad, aforo u otra. En la figura 74 se muestra la correspondencia entre uno de los contornos del *frame* inmediatamente anterior (en rojo) y uno del actual (en verde).

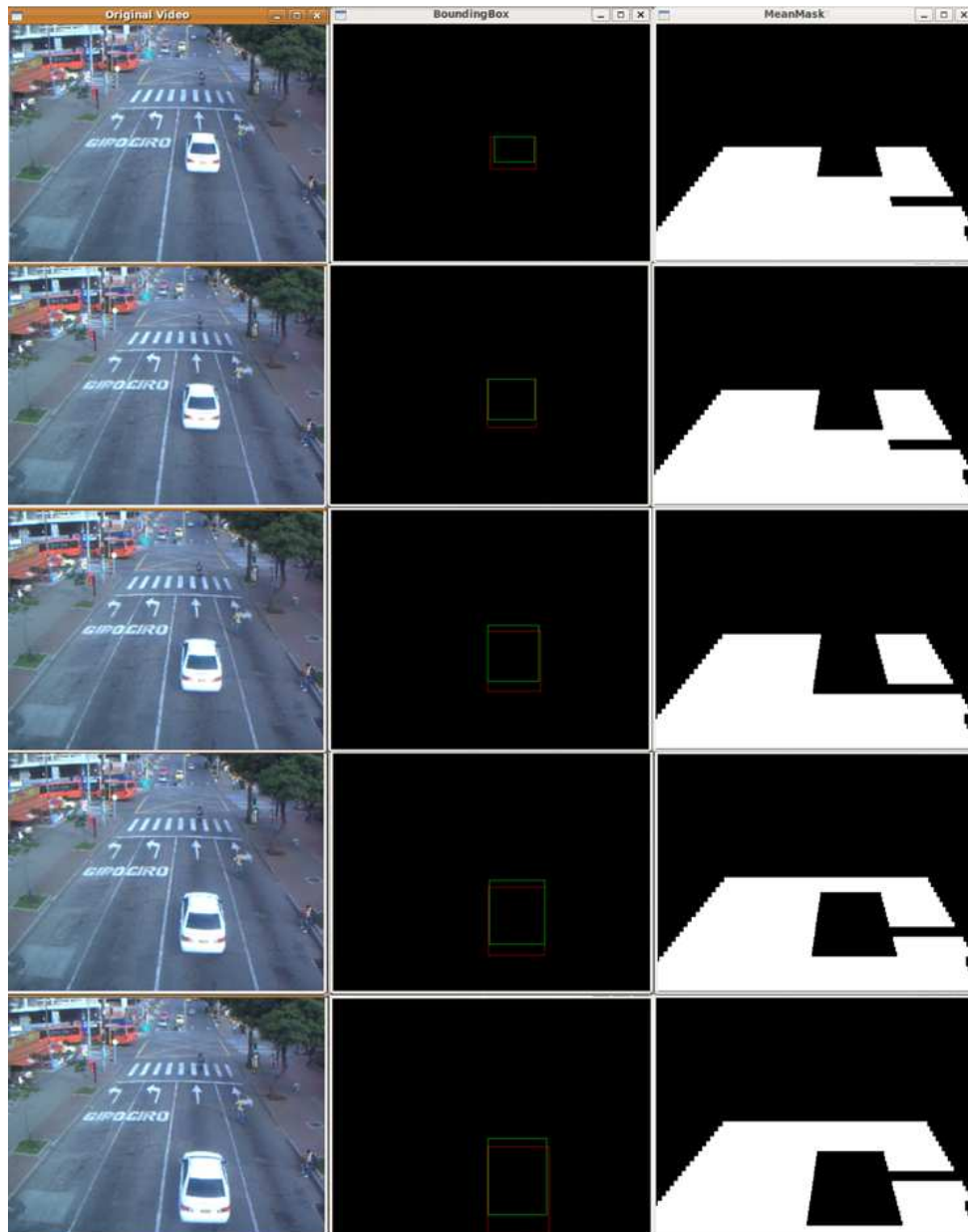
Figura 74. Correspondencia de contornos



Fuente: El autor

En la figura 74 se ilustra una pequeña secuencia de *frames* con el objetivo de mostrar la manera en la que se hace seguimiento a un objeto. Desde la primera secuencia de imágenes (en la parte inferior) se detecta el automóvil y este es seguido a través de la escena (ascendiendo en la imagen). Note como la máscara de actualización del *background* va eliminando las zonas en las que el automóvil es detectado. De nuevo, esto se debe a la alta variación de la desviación estándar que el auto genera a través de las regiones. De hecho, cambios tan pequeños como la persona sentada en la acera de la derecha provoca que esa región no sea actualizada en ningún momento de la secuencia expuesta.

Figura 75. Seguimiento del algoritmo



Fuente: El autor

3.8.12 Aforo de vehículos

Ahora bien, ya que se tiene un seguimiento de los objetos a través de la secuencia de *frames*, realizar la cuenta es bastante simple. Una vez detectado un objeto se incrementa la cuenta y se establece en verdadero una variable booleana *contado* propia del contorno asociado al objeto. En el siguiente *frame*, cuando ese mismo contorno es detectado, se revisa esta etiqueta y, si esta ya ha sido establecida como verdadera, el blob no se tiene en cuenta como uno nuevo. En caso contrario, de no existir una relación entre el nuevo blob y alguno de los ya registrados, significa que es uno completamente nuevo y debe contarse.

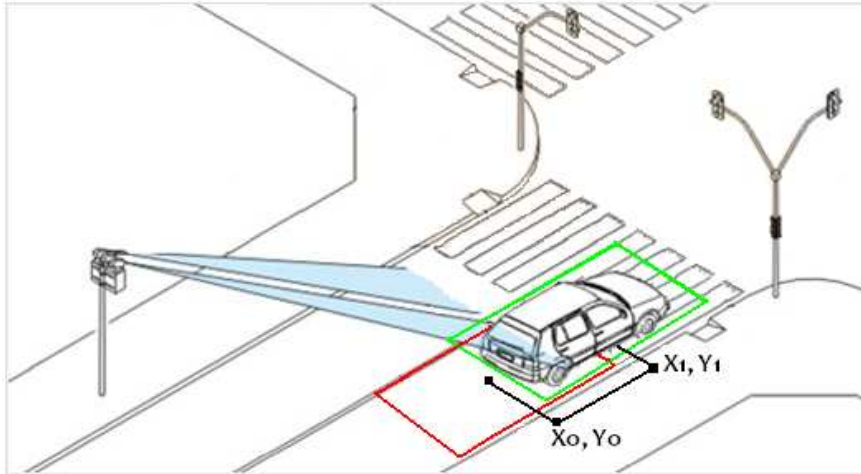
3.8.13 Estimación de velocidad

Partiendo del mismo principio para realizar el conteo, es posible hacer una estimación promedio de la velocidad. Para ello, una vez relacionados los contornos con sus correspondientes en el *frame* anterior, se procede a medir cuantos pixeles se desplazó el centroide del auto al que corresponden dichos contornos. Con esto, y ya que se conocen la distancia y altura de la cámara, es posible hacer una regresión lineal para conocer la distancia real que se desplazó el auto. Como también se conoce la tasa de *frames* a la que se está recibiendo el video es posible entonces, con espacio y tiempo, estimar la velocidad del vehículo detectado.

Como ejemplo, considere el caso de la figura 76, en ella se ilustra un carro cuyo centroide acaba de pasar del punto (X_0, Y_0) correspondiente a la caja de frontera en rojo, hasta el punto (X_1, Y_1) correspondiente a la caja de frontera en verde.

A partir de estos dos puntos se puede hallar su desplazamiento en pixeles, en consecuencia, a través de la regresión lineal que relaciona los pixeles con las distancias reales, se puede calcular el desplazamiento real del vehículo en metros; con la cantidad de *frames* por segundo que transmite la cámara se puede saber cuánto tiempo transcurrió en ese desplazamiento, logrando así, calcular la velocidad del vehículo.

Figura 76. Estimación de velocidad



Fuente: El autor

3.9 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El algoritmo ha sido probado tanto en tiempo real como en videos grabados a lo largo de la ciudad. Cada video, responde a las características similares del problema, esto con el fin de obtener datos fiables en situaciones similares. El proceso de pruebas se describirá a continuación.

Las pruebas han seguido un protocolo, diseñado con el fin de llevar un orden en las distintas etapas del proceso, desde la adquisición del video, la ejecución del algoritmo hasta el resumen de datos.

3.9.1 Adquisición

El proceso de adquisición de videos ha sido llevado a cabo en las siguientes ubicaciones:

- Puente Peatonal UCPR, Avenida Sur, en ambos sentidos viales.
- Semáforo cll 14 cra 21, Parque de Álamos.
- Invico
- Cuba

Se tienen distintas duraciones de video, que van desde 1 minuto hasta 30 minutos y distintas condiciones de luz. Además, la ubicación de la cámara para la adquisición del video se ha preservado a lo largo de los escenarios de prueba.

Tabla 7. Características del video adquirido

Característica	Valor
Frames por Segundo	15~65
Resolución	640x480
Espacio de colores	RGB
Duración	1~30Minutos
Altura de la cámara	7 mts
Angulo de inclinación	~ -40°

Fuente: El autor

Todos los videos han sido guardados en el banco de pruebas del Observatorio de Movilidad Vial de la Ciudad de Pereira, de libre acceso para la comunidad académica.

Tabla 8. Videos adquiridos para procesar

Nº.	Nombre	Duración (min:seg)	Dirección
1	Ucpr_1.avi	3:36	Ave. Sur, Puente peatonal UCPR
2	Ucpr_2.avi	4:28	Ave. Sur, Puente peatonal UCPR (sentido contrario)
3	Ucpr_3.avi	4:12	Ave. Sur, Puente peatonal UCPR
4	Ucpr_4.avi	3:27	Ave. Sur, Puente peatonal UCPR
5	Ucpr_5.avi	4:06	Ave. Sur, Puente peatonal UCPR
6	Pinares_1.mov	0:56	Semáforo cll 14 cra 21, Parque de Álamos
7	Pinares_2.mov	1:12	Semáforo cll 14 cra 21, Parque de Álamos
8	Pinares_3.mov	1:08	Semáforo cll 14 cra 21, Parque de Álamos
9	Pinares_4.mov	1:01	Semáforo cll 14 cra 21, Parque de Álamos
10	Pinares_5.mov	1:43	Semáforo cll 14 cra 21, Parque de Álamos
11	Cuba_1.avi	3:26	Puente Peatonal, Parque de Cuba
12	Invico_1.avi	17:28	Cll 14 cra 27 (Sentido Oriente-Occidente)
13	Invico_2.avi	29:45	Cll 14 cra 27 (Sentido Oriente-Occidente)

Fuente: El autor

Figura 77. Banco de pruebas



Fuente: El autor

3.9.2 Ejecución

En la siguiente sección, se examinará los tiempos de ejecución, la precisión del conteo, y la estimación de velocidad del algoritmo, esto con el fin de visualizar las ventajas de la implementación en el presente proyecto.

3.9.3 Rendimiento

Debido a que el presente desarrollo, persigue una ejecución satisfactoria en tiempo real. Para las pruebas de rendimiento se ha decidido medir el tiempo necesario que toma cada *frame* en ser procesado como parámetro de referencia.

Tabla 9. Desempeño de videos

Nº.	Nombre	FPS	No. Frames a Procesar
1	Ucpr_1.avi	30	6480
2	Ucpr_2.avi	30	8040
3	Ucpr_3.avi	15	3780
4	Ucpr_4.avi	30	6210
5	Ucpr_5.avi	30	7380
6	Pinares_1.mov	50	2800
7	Pinares_2.mov	45	3240
8	Pinares_3.mov	58	3944
9	Pinares_4.mov	65	3965
10	Pinares_5.mov	36	3708
11	Cuba_1.avi	30	6180
12	Invico_1.avi	14	14672
13	Invico_2.avi	30	53550

Fuente: El autor

En total se realizaron 3 pruebas

GTK+X11: Esta prueba busca demostrar la incidencia del proceso de dibujado por parte de la aplicación, en el entorno grafico, y como éste se sobrecarga durante la ejecución del algoritmo.

X11: Esta prueba complementa la anterior, tomando el tiempo de procesamiento que toma cada *frame*, sin ser dibujado.

TTY: Como última prueba de rendimiento, se ha deshabilitado el entorno grafico de la distribución, y se ha procedido a ejecutar desde una terminal tty.

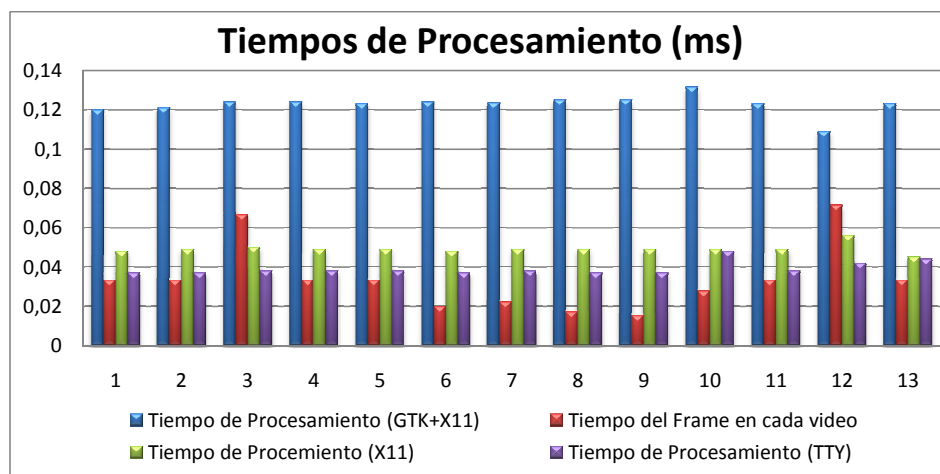
Tabla 10. Desempeño en *fps* de los videos adquiridos

Nombre	TP Frame	FPS	TP (GTK+X11)	FPS (GTK+X11)	TP (X11)	FPS (X11)	TP (TTY)	FPS (TTY)
Ucpr_1.avi	0,03333333	30	0,12	8,33333333	0,048	20,83	0,037	27,03
Ucpr_2.avi	0,03333333	30	0,121	8,26446281	0,049	20,41	0,037	27,03
Ucpr_3.avi	0,06666667	15	0,124	8,06451613	0,05	20	0,038	26,36
Ucpr_4.avi	0,03333333	30	0,124	8,06451613	0,049	20,41	0,038	26,32
Ucpr_5.avi	0,03333333	30	0,123	8,1300813	0,049	20,41	0,038	26,32
Pinares_1.mov	0,02	50	0,124	8,06451613	0,048	20,83	0,037	27,03
Pinares_2.mov	0,02222222	45	0,1235	8,09716599	0,049	20,41	0,038	26,32
Pinares_3.mov	0,01724138	58	0,125	8	0,049	20,41	0,037	27,03
Pinares_4.mov	0,01538462	65	0,125	8	0,049	20,41	0,037	27,03
Pinares_5.mov	0,02777778	36	0,1315	7,60456274	0,049	20,41	0,048	20,83
Cuba_1.avi	0,03333333	30	0,123	8,1300813	0,049	20,41	0,038	26,32
Invico_1.avi	0,07142857	14	0,109	9,17431193	0,56	1,79	0,042	23,82
Invico_2.avi	0,03333333	30	0,123	8,1300813	0,45	2,22	0,044	22,73

Fuente: El autor

Basados en los datos de la tabla anterior, se ha realizado un análisis de tiempos de ejecución en cada escenario, con el fin de apreciar los niveles de rendimiento de la aplicación bajo distintos escenarios de funcionamiento.

Figura 78. Tiempos de procesamiento de la aplicación en los distintos escenarios de ejecución

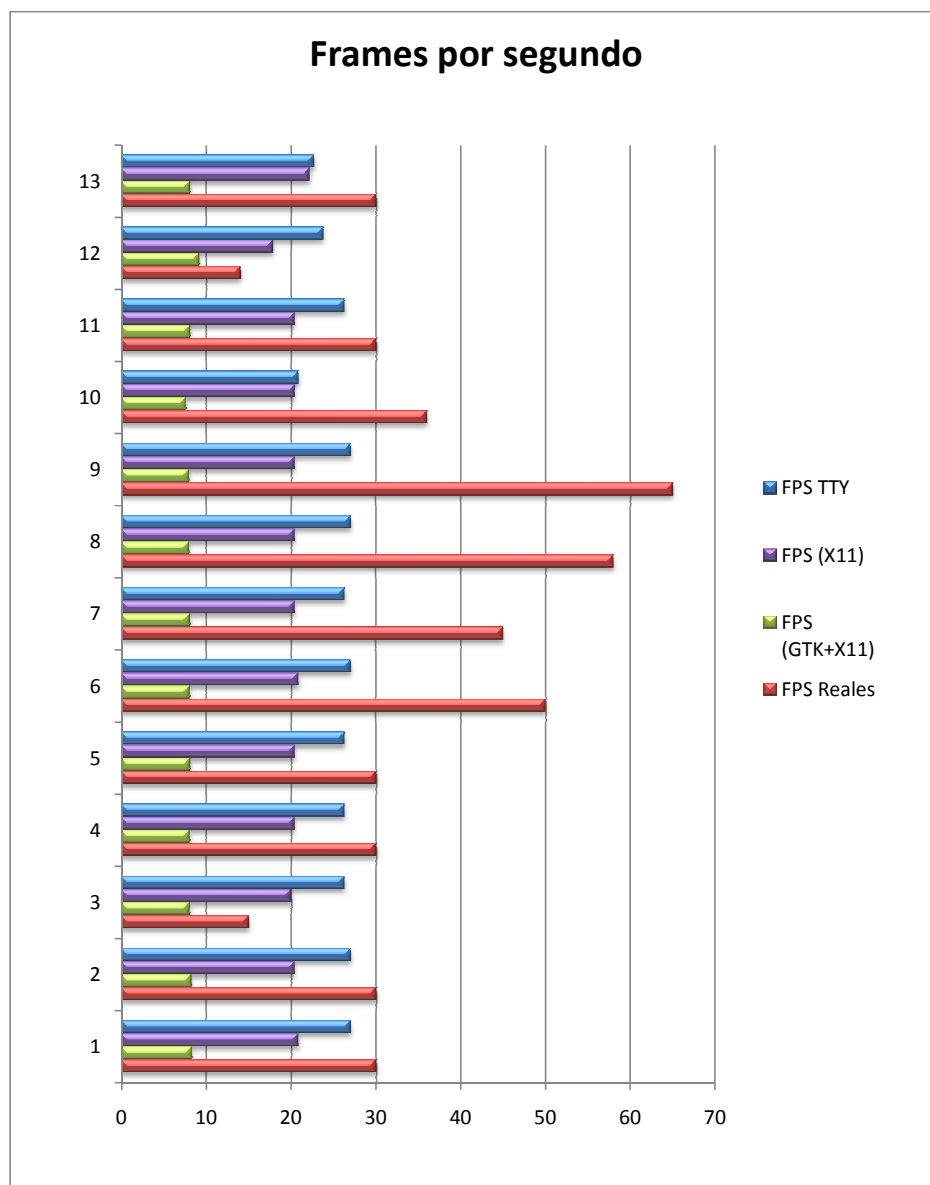


Fuente: El autor

Además del anterior análisis, se obtuvieron los rendimientos de la aplicación en *Frames* por segundo versus el número de *Frames* a los que corre el video, esto con el fin de apreciar que tan cerca se está del procesamiento en tiempo real.

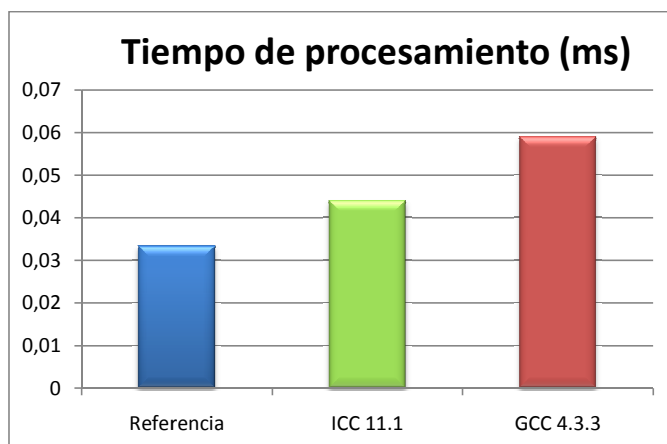
Para finalizar el apartado de rendimiento, la aplicación fue compilada con GCC y el compilador de Intel, después fue sometida a una prueba de ejecución adicional sin entorno gráfico con el video de pruebas "*Invico_2.avi*", esto con el fin de medir el impacto en la aplicación del uso de una estrategia de optimización como se muestra en la figura 80 y 81.

Figura 79. Cantidad de *frames* por segundo en cada escenario de ejecución



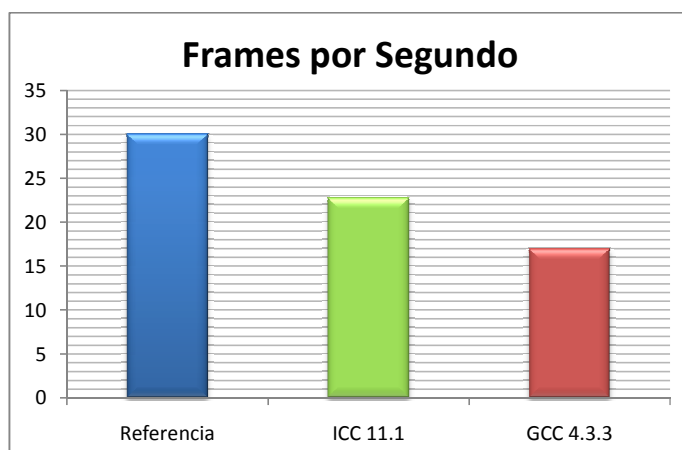
Fuente: El autor

Figura 80. Tiempo de procesamiento para cada *frame* en el video “invico_2.avi”



Fuente: El autor

Figura 81. *Frames* por segundo procesados video “invico_2.avi”



Fuente: El autor

3.9.4 Aforo

En la presente sección se someterá a pruebas el conteo automático hecho por el algoritmo sobre dos ubicaciones del banco de pruebas, es necesario aclarar, que cada escena posee características únicas, propias de la intersección que se describirán a continuación:

3.9.4.1 El Caso Invico

Esta escena pertenece a la intersección de la calle 14 y la carrera 17 de la ciudad de Pereira. Sin lugar a equivocarnos, esta es una de las intersecciones con mayor congestión vehicular y dificultades como: el constante flujo de peatones, vendedores ambulantes, personas con publicidad en las cebras, entre otras tantas. Todo esto, convierte al caso invico en uno de los más exigentes escenarios de prueba. Es importante mencionar que si bien las pruebas se realizan en gran parte sobre el caso invico, el algoritmo desarrollado es completamente parametrizable, lo que permite adecuarlo a cualquier intersección. Todo esto se evidencia en la etapa de pruebas, donde se analizan otros casos.

En cuanto a la ubicación de la cámara, esta se encuentra a una distancia horizontal de 30 metros del semáforo y a una altura de 7 metros sobre el nivel de la calle. La ubicación de la cámara fue discutida ampliamente por los miembros del Grupo de Investigación Sirius. Dicha ubicación tiene en cuenta las exigencias mínimas para el propósito de medición de variables, pero también se ve afectada por otros objetivos e intereses del Observatorio de Movilidad que están fuera del alcance de este proyecto.

Figura 82. El caso Invico



Fuente: El autor

3.9.4.2 UCPR

Este escenario está ubicado en la Avenida Sur, justo en el puente peatonal de la UCPR. Cabe anotar que es uno de los escenarios más propicios para la prueba del algoritmo, ya que, cuenta con características similares de altura y distancia con el caso Invico, pero presenta problemas de vibración en el video, debido a que la adquisición sobre el puente peatonal, presentaba vibraciones al paso de automotores pesados.

3.9.4.3 Aforo manual

El proceso de conteo manual, ha sido llevado a cabo por 3 personas ajenas al proyecto, esto con el fin de conservar la neutralidad de los resultados, además de obtener información adicional como la desviación estándar y la varianza de los mismos propios de un conteo manual.

Tabla 11. Aforo manual

Aforo Manual						
Video	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
1	69	68	68	68,332	0,577	0,333
2	65	65	67	65,660	1,155	1,333
4	86	90	92	89,298	3,055	9,333
5	72	71	72	71,665	0,577	0,333
11	69	66	68	67,655	1,528	2,333

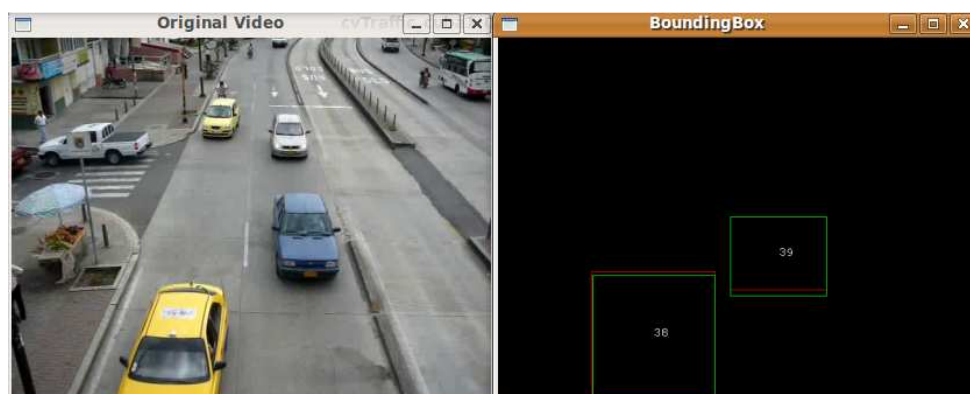
Fuente: El autor

Es necesario especificar que cada escenario cuenta con un número de carriles, una región de interés y un número de segmentos propios de la escena, que serán especificados en la siguiente sección.

3.9.4.4 Aforo automático

El conteo automático, llevado a cabo por el algoritmo del presente proyecto (Figura 8-7), ha presentado los siguientes resultados:

Figura 83. Aforo automático



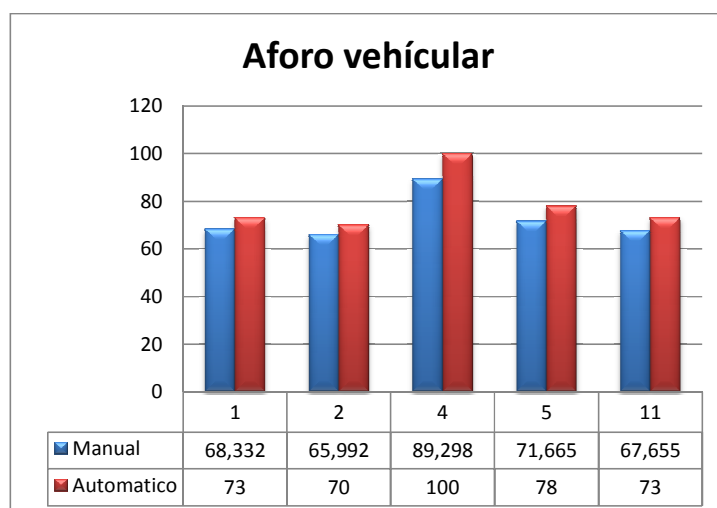
Fuente: El autor

Tabla 12. Aforo automático versus manual

Aforo: Manual vs Automático					
Video	Carriles	No. Segmentos	Conteo Manual	Algoritmo	Error
1	2	46	68,332	73	6,832
2	2	46	65,992	70	6,073
4	2	46	89,298	100	11,984
5	2	46	71,665	78	8,840
11	2	46	67,655	73	7,900

Fuente: El autor

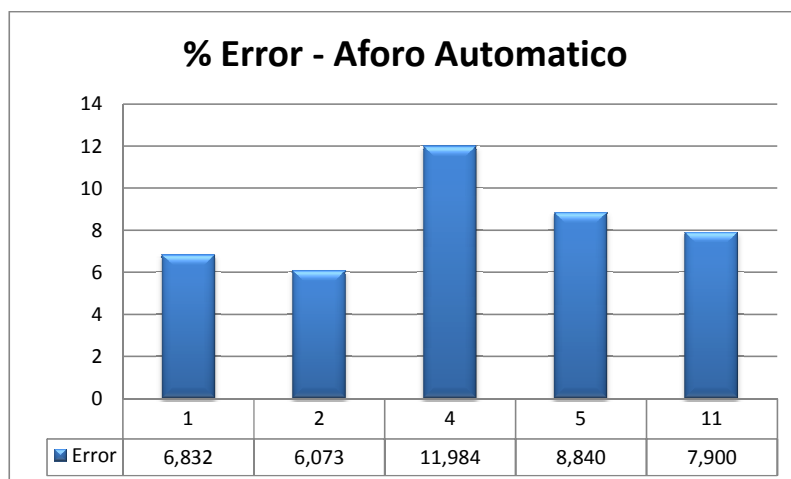
Figura 84. Aforo automático versus manual



Fuente: El autor

La figura 84, resume los resultados de las pruebas sometidas al algoritmo con los distintos videos del banco de pruebas. La tasa de error entre un mínimo del 6% hasta un máximo cercano 12%:

Figura 85. Error porcentual del algoritmo de aforo automático

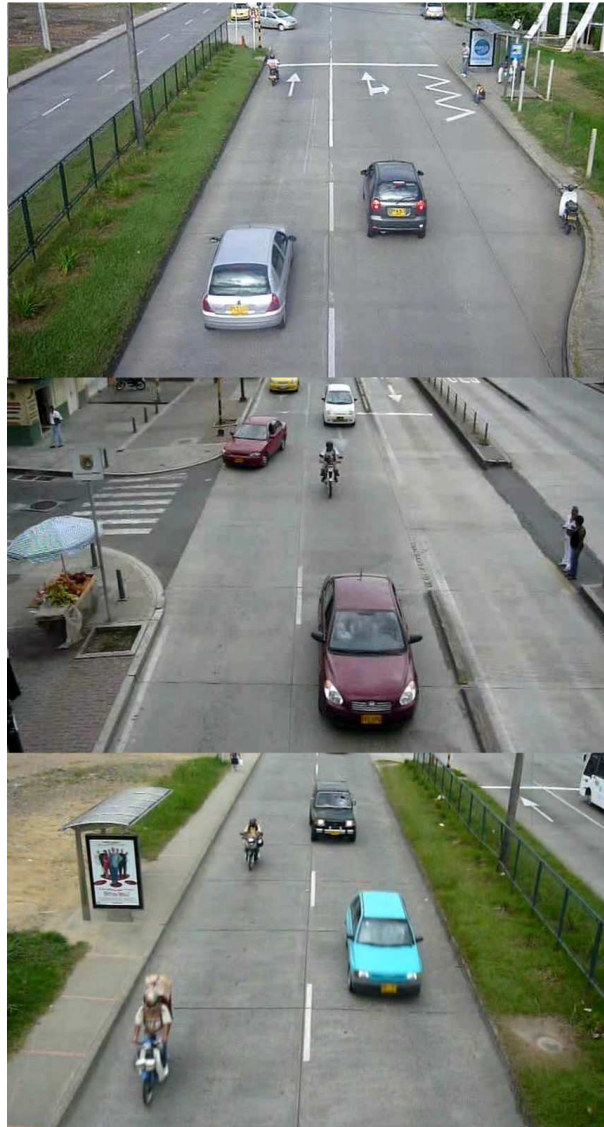


Fuente: El autor

Si se mira detalladamente los porcentajes de error, y se relacionan los valores obtenidos tanto del algoritmo como del aforo manual, destaca el hecho de que el primero siempre entregue cifras mayores a las reales, esto muestra cierto espacio de optimizaciones y mejoras en el campo de las operaciones morfológicas antes del proceso de creación de los bounding box, y su registro, esto con el fin de reducir el conteo de falsos positivos que conlleven a resultados más robustos.

Destaca además, los resultados obtenidos en los videos 2 y 11, cuya diferencia radica en la orientación vial (N-S), la cual no ha sido ningún problema para el algoritmo, entregando resultados confiables en ambos sentidos.

Figura 86. Sentido vial



Fuente: El autor

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo de algoritmos de visión por computador es un gran reto en el cual se exige un claro conocimiento en matemáticas, estrategias de programación, optimización de algoritmos, tratamiento digital de señales, entre otros. La medición de variables de tráfico no es la excepción a esta regla, es por tal motivo que se requiere tener una visión holística en donde se apliquen conceptos desde la estadística básica hasta complejas transformaciones espaciales, intentando lograr una armonía sinfónica de todos estos conceptos hacia el cumplimiento del objetivo planteado. Las siguientes conclusiones no se limitan al desarrollo de este proyecto, ellas son el resultado de un arduo trabajo de equipo, mucho compromiso con el grupo de investigación y con el principal proyecto en ejecución en este momento “Observatorio de Movilidad Vial”, un análisis exhaustivo de las amplias pruebas realizadas y la toma de muchos posibles caminos de donde a veces no se tenía real certeza de su viabilidad debido a la inmadurez del área.

- La medición de variables de tráfico en tiempo real requiere de una alta capacidad de procesamiento, que permita obtener de forma confiable y oportuna la información más relevante al instante, de ahí que se requiera una solución especializada, capaz de responder a las necesidades del problema. Por lo tanto, este trabajo aprovecha los diferentes recursos ofrecidos por la visión por computador, para ofrecer una solución robusta de adquisición de variables de tráfico para el Observatorio de Movilidad Vial de la ciudad de Pereira
- Resulta de vital importancia una adecuada plataforma de adquisición de imágenes y de procesamiento, que permita mantener un buen equilibrio entre costos, desempeño y tiempo de desarrollo. La elección de un sistema embebido basado en un procesador Intel brindó la plataforma necesaria para una real integración entre las librerías utilizadas y el compilador que pudiera optimizar su ejecución en esta, así mismo, el sistema operativo Ubuntu Desktop, brindó un ambiente de desarrollo de plataforma abierta y de fácil uso. Esta integración ha permitido el desempeño necesario para que el algoritmo pueda ser ejecutado con video en tiempo real.
- OpenCV ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de aplicaciones de visión por computador desde su creación y este trabajo, de nuevo, no ha sido la excepción. OpenCV ha sido una librería de algoritmos que ha facilitado los procesos de manipulación de imágenes, manteniendo un excelente desempeño en la plataforma seleccionada.
- Dadas las características del problema y su solución a través de visión por computador, es pertinente afirmar, que un exitoso uso de la misma como herramienta de monitoreo y adquisición de variables viales, es posible de alcanzar

siempre y cuando la tarea haya sido finamente delimitada. Por lo tanto es acertado pensar, que no hay una solución algorítmica global para cada intersección y, se hace necesario delimitar cuidadosamente las fronteras del problema para que un algoritmo parametrizable se acomode a cada caso de forma específica.

Aunque los resultados obtenidos con el algoritmo desarrollado son buenos y tienen un alto valor, el mayor aporte de este trabajo se ve reflejado en la cantidad de puertas que se abren en el panorama. Abajo se citan algunos de los futuros trabajos que se deben realizar como continuación de este proyecto y la implementación del Observatorio de Movilidad en Tiempo Real.

- Detección de placas vehiculares en tiempo real.
- Tamaño de colas vehiculares que permita la programación de tiempos de semáforos de acuerdo a la demanda.
- Clasificación de automotores en tiempo real.
- Detección de incidentes en la vía.
- Detección de infracciones en tiempo real.
- Rastreo vehicular.

BIBLIOGRAFÍA

1. **European Metropolitan Transport Authorities (EMTA)**. EMTA - Presentation. [En línea] [Citado el: 05 de Junio de 2009.] <http://www.emta.com/>.
2. **International Association of Public Transport (UITP)**. UITP - Division Latinoamerica. [En línea] [Citado el: 05 de Junio de 2009.] <http://www.uitp.org/regions/latin-america/index.cfm>.
3. **GREENPEACE España**. Proposición de Ley de Movilidad Sostenible. [En línea] [Citado el: 05 de Junio de 2009.] <http://www.greenpeace.org/espana/reports/090901>.
4. **World Commission on Environment and Development**. Our Common Future. *Brundtland Report*. 1987, págs. Oxford University Press, for the WCED.
5. **Centre for Sustainable Transportation (CST)**. Defining Sustainable. [En línea] 2005. [Citado el: 05 de Junio de 2009.] http://cst.uwinnipeg.ca/documents/Defining_Sustainable_2005.pdf.
6. **The Victoria Transport Policy Institute**. Sustainable Transportation and TDM. [En línea] Mayo de 2009. [Citado el: 04 de Mayo de 2009.] <http://www.vtpi.org/tdm/tdm67.htm>.
7. **Environmental Transport Association (ETA)**. In Town Without My Car! [En línea] [Citado el: 04 de Julio de 2009.] http://www.eta.co.uk/our_work/in_town_without_my_car/.
8. **Unión Europea**. European Mobility Week. [En línea] [Citado el: 21 de Agosto de 2009.] <http://www.mobilityweek.eu/>.
9. —. Iniciativa CIVITAS. [En línea] [Citado el: 20 de Agosto de 2009.] <http://www.civitas.eu/>.
10. —. POLIS. [En línea] [Citado el: 21 de Abril de 2009.] <http://www.polis-online.org/>.
11. **Centre for Sustainable Transportation (CST)**. The Centre for Sustainable Transportation (CST). [En línea] 22 de Abril de 2009. <http://www.centreforsustainabletransportation.org/>.
12. —. Complector - The CST Newsletter. [En línea] Octubre de 2009. [Citado el: 15 de Octubre de 2009.] http://www.centreforsustainabletransportation.org/documents/CSTAutumnNewsletter_001.pdf.

13. **The Victoria Transport Policy Institute.** Sitio Oficial. [En línea] [Citado el: 27 de Abril de 2009.]
14. **EUROCITIES.** Sitio Oficial Eurocities. [En línea] [Citado el: 27 de Abril de 2009.] <http://www.eurocities.eu/main.php>.
15. **European Platform on Mobility Management (EPOMM).** Sitio Oficial EPOMM. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2009.] <http://www.epomm.org/>.
16. **PROCEED .** Principios para la operación y el desarrollo de un transporte público de alta calidad. [En línea] [Citado el: 27 de Abril de 2009.] <http://www.proceedproject.net/>.
17. **Travelmatters.** Sitio Oficial Travelmatters. [En línea] [Citado el: 27 de Abril de 2009.] <http://www.travelmatters.org/>.
18. **European Metropolitan Transport Authorities (EMTA).** Barometer of Public Transport in the European Metropolitan Areas. [En línea] 2002. [Citado el: 20 de Agosto de 2009.] http://www.emta.com/article.php3?id_article=267.
19. **Observatorio de la Movilidad Metropolitana (OMM).** OMM Sitio Oficial. [En línea] 2004. <http://www.transyt.upm.es/index.php?pageID=111>.
20. **Centro de Investigación del Transporte TRANSyT.** Sitio Oficial TRANSyT. [En línea] 2002. <http://www.transyt.upm.es/>.
21. **Cámara de Comercio de Bogotá (CCB).** Observatorio de Movilidad Bogotá. [En línea] 2007. <http://www.centreforsustainabletransportation.org/past-events.htm>.
22. **Plan Integral de Movilidad Metropolitana.** DIAGNÓSTICO Y FORMULACIÓN DEL PIMM. [aut. libro] Fernando Cortés Larreamendy. Pereira : s.n., 2006.
23. **Univesidad Nacional de Colombia.** Primera Jornada Internacional Sobre Observatorio de la Movilidad Urbana. [En línea] 2008. http://www.transyt.upm.es/files/investigacion/proyectos/movilidad_urbana_colombia/ProyectoUPM.pdf.
24. **E. Trucco, A.Verri.** *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. NJ : Prentice Hall PTR, 1998. ISBN:0132611082.
25. **Wikipedia.** Computer Vision. [En línea] [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_vision.

26. **UKIVA.** Machine Vision Handbook. [En línea] Octubre de 2007. [Citado el: 29 de Octubre de 2009.] [http://www.ukiva.org/newsite/Resources/Machine%20Vision%20Handbook%20\(A5\).pdf](http://www.ukiva.org/newsite/Resources/Machine%20Vision%20Handbook%20(A5).pdf).
27. **Servicios Austral.** Fotografía Digital - Espacio de Colores. [En línea] 14 de 10 de 2008. [Citado el: 20 de 10 de 2009.] <http://www.fotografianoviasmatrimonios.com/contenido.php/espacios-de-color>.
28. **Gary Bradski, Adrian Kaehler.** *Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library*. s.l. : O'Reilly Media, 2008.
29. **Henk J.A.M. Heijmans, Jos B.T.M. Roerdink.** *Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing*. s.l. : Springer, 1998. ISBN-10: 0792351339.
30. *AUTOMATIC ESTIMATION OF VEHICLE SPEED FROM UNCALIBRATED VIDEO SEQUENCES.* **Lazaros Grammatikopoulos, George Karras, Elli Petsa.** Sofia : s.n., 2005. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODERN TECHNOLOGIES, EDUCATION AND PROFESSIONAL PRACTICE IN GEODESY AND RELATED FIELDS.
31. **Fisher, Robert B.** CVonline: Overview. [En línea] University of Edinburgh, Noviembre de 1999. [Citado el: 29 de Octubre de 2009.] <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/SUPPORT/overview.htm>.
32. **Image Sensing Systems.** ISS Brochure. [En línea] 2008. [Citado el: 29 de Octubre de 2009.] http://www.imagesensing.com/about/dl/ISS_Autoscope_v03.pdf.
33. **Traficon.** Video análisis para captación de datos de Tráfico, detección automática de incidentes y detección de presencia. [En línea] [Citado el: 29 de Octubre de 2009.] <http://www.traficon.com/index.jsp>.
34. **Calderon, Francisco y Urrego, German.** *Conteo Automatico de Vehiculos*. Bogota : s.n., 2008.
35. **European Metropolitan Transport Authorities (EMTA).** Sitio Web EMTA. [En línea] 2009. [Citado el: 05 de Abril de 2009.] <http://www.emta.com>.
36. **The New York Times.** Oliver Selfridge, an Early Innovator in Artificial Intelligence, Dies at 82. [En línea] 3 de Diciembre de 2008. [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] <http://www.nytimes.com/2008/12/04/us/04selfridge.html?partner=rss&emc=rss>. Retrieved 2008-12-10..

37. **Garnham, Allan.** *Artificial Intelligence: An Introduction (Introductions to Modern Psychology)* . s.l. : Routledge & Kegan Paul Books Ltd, 1988.
38. **The Journal of the Pattern Recognition Society.** *Pattern Recognition*. [Revista] s.l. : Elsevier.
39. **Rosenfeld, Azriel.** *Picture Processing by Computer*. NY : ACM New York, 1969. 0360-0300.
40. **ICPR.** International Conference on Pattern Recognition. [En línea] [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] <http://www.icpr2010.org/includes/IAPR-History.pdf>.
41. **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.** [En línea] [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] <http://cvl.umiacs.umd.edu/conferences/cvpr2010/>.
42. **IAPR.** International Association for Pattern Recognition. [En línea] [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] <http://www.iapr.org/docs/IAPR-History.pdf>.
43. *DIDAK, a Digital Image Processing System.* **Wiesel, J.** 1980.
44. *Active Vision.* **J.Y. Aloimonos, I. Weiss y A. Bandopadhyay.** s.l. : International Journal on Computer Vision.
45. **Reignier, Patrick.** Origins of Active Computer Vision. [En línea] 30 de Junio de 1995. [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/ECVNET/CROWLEY1/node2.html#SECTION00011000000000000000.
46. **Hainich, Rolf R.** *The End of Hardware: Augmented Reality and Beyond* . s.l. : BookSurge Publishing, 2009. ISBN-10: 143923602X.
47. **CogVis consortium.** CogVis: The Cognitive Vision Project. [En línea] [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] <http://www.comp.leeds.ac.uk/vision/cogvis/>.
48. **Verri, E. Trucco y A.** *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. NJ : Prentice Hall PTR, 1998. ISBN:0132611082.
49. **Wikipedia.** Oliver Selfridge. [En línea] [Citado el: 29 de Septiembre de 2009.] http://en.wikipedia.org/wiki/Oliver_Selfridge.

50. —. Teoría del color. [En línea] [Citado el: 20 de 10 de 2009.] http://es.wikipedia.org/wiki/Teoría_del_color.